

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Měření odchylky kruhovitosti součástí
o průměru 60 mm**

Roudness Deviation Measurement
of 60 mm Diametr Parts

Student:

Lucie Vojtíšková

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Student: **Lucie Vojtíšková**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Měření odchylky kruhovitosti součástí o průměru 60 mm**
Roudness Deviation Measurement of 60 mm Diameter Parts
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Přehled současného stavu měření odchylky kruhovitosti.
3. Metody a strategie měření odchylky kruhovitosti.
4. Experimentální část.
5. Zhodnocení.
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

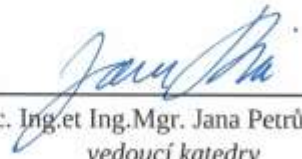
ČEPOVÁ, L.; PETŘKOVSKÁ, L. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011. 100 s. ISBN 978-80-248-2514-4.
PETŘKOVSKÁ, L.; ČEPOVÁ, L. *Metrologie a řízení kvality*. Ostrava: VŠB-TUO, 2012. 142 s. ISBN 978-80-248-2771-1. Dostupné na <http://projekty.fs.vsb.cz/459/?ucebni-opory>.
TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie, část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006. 104 s. ISBN 80-248-0671-1.
PERNIKÁŘ, J.; TYKAL, M.; VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno: CERM, 2001.
Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1997-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřová, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Lenky Čepové, Ph.D. a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. 5. 2018


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědoma, že na tuto mojí závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/200 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněná v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovištích vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

21. 5. 2018



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Lucie Vojtíšková

Adresa trvalého pobytu autora práce: Palackého 1664/1, Šumperk 787 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vojtíšková, L. *Měření odchyly kruhovitosti součástí o průměru 60 mm: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 59 s. Vedoucí práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá tématem měření odchyly kruhovitosti. Jejím obsahem je přehled několika základních pojmů a dalších poznatků o dané problematice. Práce je rozdělena do dvou částí, na teoretickou a experimentální. V teoretické části jsou tématem například geometrické tolerance, druhy metod měření kruhovitosti, předepsané normy dle ČSN, nebo měřicí zařízení. Experimentální část je věnována závislosti měřené odchyly kruhovitosti na drsnosti povrchu a následné porovnání všech výsledných měření, což bylo také hlavním cílem celé bakalářské práce.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

Vojtíšková, L. – *Measuring Roundness Deviation Measurement of 60 mm Diameter Part: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2018, 59 p. Thesis head: Ing. Lenka Čepová, Ph, D.

The bachelor thesis deals with the measurement of circularity deviation. It contains an overview of several basic concepts and other knowledge about the given issue. The thesis is divided into two parts, theoretical and experimental. In the theoretical part, the theme is for example: geometric tolerances, types of circularity measurement methods, prescribed standards according to ČSN or measuring equipment. The experimental part is focused on the dependence of measured deviation of circularity on roughness surface and to compare all the resulting measurements, which was also the main goal of the bachelor thesis.

Obsah

Úvod.....	10
1 Přehled současného stavu řešení problematiky	11
1.1 Geometrické tolerance	11
1.1.1 Geometrické tolerance tvaru.....	12
1.1.2 Kruhovitost.....	13
1.1.3 Příčiny vzniku geometrických odchylek	14
2 Měřicí metody odchylek kruhovitosti.....	17
2.1 Spojitá metoda	17
2.1.1 Absolutní metoda	17
2.1.2 Relativní metoda.....	19
2.1.3 Skenovací metoda.....	22
2.2 Nespojité metoda (metoda diskrétní).....	22
2.3 Normy spojené s kruhovitostí	23
3 Chyby a nejistoty měření.....	25
3.1 Chyby měření	25
3.1.1 Hrubé chyby.....	25
3.1.2 Systematické chyby.....	25
3.1.3 Náhodné chyby	25
4 Souřadnicové měřicí stroje (CMM)	29
4.1 Typy CMM	30
4.1.1 Dělení strojů podle počtu souřadnicového měření:.....	30
4.1.2 Snímací systémy.....	32
4.1.3 Měřicí dotyky	33
4.1.4 Typy dotyků.....	34
4.1.5 Materiály kuliček:.....	34
4.1.6 Materiál stopky (dříku) měřicího dotyku:.....	35
5 Experimentální část.....	36
5.1 Výroba vzorků.....	37
5.2 Parametry měřicího zařízení	40
5.3 Experimentální měření.....	42

6	Grafické a numerické vyhodnocení	43
6.1	Výpočet výsledných hodnot	43
6.2	Vyhodnocení měření	54
7	Závěr.....	56
	Použitá literatura.....	58

Seznam použitých značek a symbolů:

<u>Symbol</u>	<u>Význam</u>	<u>Jednotka</u>
A_1	kružnice se středem C_1	
A_2	kružnice se středem C_2	
a_p	hloubka řezu	[mm]
A_5	tažnost	[%]
B	celková délka	[mm]
C_1	střed kružnice A_1	
C_2	střed kružnice A_2	
CAD	počítačem podporované projektování (Computer-aided design)	
CNC	počítačem řízený systém (Computer Numerical Control)	
CMM	souřadnicový měřicí stroj	
ČSN	česká technická norma (Coordinate Measuring Machine)	
D	efektivní činná délka (effective working length)	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[GPa]
f	posuv	[mm]
GPS	geometrická specifikace výrobku (Geometrical Product Specification)	
HB	Tvrdost	
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)	
K_n	konstantní součinitel	
k_u	koeficient rozšíření	
LSCI	střední kružnice nejmenších čtverců (Least Squares Circle)	
LSCY	střední kružnice nejmenších čtverců (u válcovitosti)	
n	počet měření	
MCC	Nejmenší opsaná kružnice (Minimum circumscribed circle)	
MIC	Největší vepsaná kružnice (Maximum inscribed circle)	
MPEe	Maximální přípustná chyba stroje CMM pro měření délky	[μ m]
MPEp	Maximální přípustná chyba snímání u stroje CMM	[μ m]
MPEthp	Maximální přípustná chyba snímání skenovací metodou	[μ m]

MZC	Kružnice nejmenšího pásma mezikruží (Minimum zone circles)	
Ra	střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
Re	mez kluzu	[MPa]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
R _{max}	maximální rádius	[μm]
R _{min}	minimální rádius	[μm]
S ₁	měřený bod	[μm]
STN	Slovenská technická norma	
S _{2,3}	body podepření	
TS	Technické specifikace	
U	rozšířená standardní nejistota	[μm]
u _A	standardní nejistota typu A	[μm]
u _B	standardní nejistota typu B	[μm]
u _C	kombinovaná standardní nejistota	[μm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	
v _c	řezná rychlost	[m/min]
x, y, z	osy v souřadném systému	
α, β	úhly	[°]
δ	relativní chyba	
ε	absolutní chyba	
r _{ε}	zaoblení břitu vyměnitelné destičky	[mm]
$\Delta r_1, \Delta r_2$	radiální vzdálenost	[μm]
\varnothing	průměr	[mm]
\bar{x}	aritmetický průměr	

Úvod

V dnešní době se jednotlivé obory dynamicky rozvíjí, do nich neodmyslitelně patří i strojírenský průmysl, který je den ode dne více inovativní a má pro naši budoucnost velký potenciál. Napříč všem těmto kladům jsou na toto odvětví kladené vysoké nároky. Zákazníci jakožto odběratelé požadují výbornou kvalitu výrobků a dbají na pečlivou výstupní kontrolu a kvalitu povrchu. Kvůli těmto nárokům se samozřejmě výrobci snaží najít různé nové způsoby, jak zlepšit nejen kvalitu a efektivitu v metrologické činnosti ale také výhodně a kvalitně obrábět na CNC strojích, jelikož tento proces je původcem většiny zhotovených výrobků ve strojírenství.

Jedním z několika způsobů, jak zefektivnit a zkvalitnit výrobu je možnost použití souřadnicových měřících strojů (CMM). Tyto stroje se díky svým vlastnostem, které zahrnovaly především univerzálnost a také flexibilitu velice rychle prosadily ve výrobě. Oproti konvenčnímu způsobu měření, který měří pouze součásti kruhového tvaru, tudíž je schopen vyhodnotit jen parametry odchylky kruhovitosti.

Co se samotného odvětví metrologie týče, můžeme říci, že se v současnosti neobejde bez pomoci počítačů. Konkrétně již výše zmíněné CMM zařízení se stalo jedním ze základních vybavení každé firmy, která my vyšší požadavky na přesnost výroby. Současná moderní doba vnáší do strojírenských firem myšlenku zcela zautomatizovat výrobu, z toho může logicky firma těžit a ve větším rozsahu zaujmout zákazníky.

I přesto, že v dnešní době disponujeme excelentními výrobními zařízeními za podpory špičkových softwarů, stále nedokážeme zhotovit výrobek dokonalého tvaru a kvality, je to z důvodu působení několika nepříznivých faktorů, jako je například kvalita materiálu, vibrace, technologie opracování apod.

Bakalářská práce se zabývá problematikou týkající se měřením odchylky kruhovitosti. Práce je rozdělena na dvě části, a to na část teoretickou a následně na část experimentální. V teoretické části bylo cílem blíže specifikovat základní pojmy k řešené problematice. V experimentální části bylo záměrem porovnat odchylky kruhovitosti v závislosti na drsnosti povrchu a také na druhu zvolené metody měření.

1.1.1 Geometrické tolerance tvaru

Pokud vezmeme v úvahu pouze jeden tvarový prvek, jeho odchylka od ideálního geometrického tvaru se nazývá odchylka tvaru. Obecně se definuje (měří) jako největší vzdálenost skutečné plochy od obalové plochy nebo od obalového profilu. Toleranční pole prvku může být ohraničené:

- **V rovině:**
 - - dvěma rovnoběžnými přímkami,
 - - mezikružím.
- **V prostoru:**
 - - dvěma rovnoběžnými rovinami,
 - - dvěma soustředěnými válci.

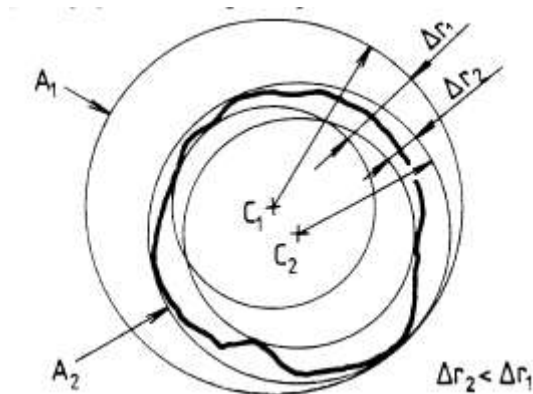
Geometrické tolerance tvaru mají nepříznivý vliv jak na funkčnost jednotlivých výrobků, tak i na celý stroj. Například od přímosti a rovnoběžnosti upínacích a vodivých ploch závisí přesnost obráběcího stroje. Odchytky kruhovitosti a válcovitosti elementů valivého ložiska zvyšují jeho hlučnost a vzájemné opotřebení jednotlivých částí. Mezi základní geometrické tolerance tvaru zařazujeme:

Tabulka 1.1 - Přehled geometrických tolerancí²

Geometrické tolerance		značka
Tvaru	Přímosti	—
	Rovinnosti	
	Kruhovitosti	
	Válcovitosti	
	Tvaru profilu	
	Tvaru plochy	
Směru	Rovnoběžnosti	//
	Kolmosti	⊥
	Sklonu	∠
Polohy	Umístění	⊕
	Soustřednosti a souososti	⊙
	Souměrnosti	≡
Házení	Kruhového	
	Celkového	

1.1.2 Kruhovitost

Toleranční zóna je ohraničena dvěma soustřednými kružnicemi v rovině, kde jejich radiální vzdálenost je úměrná předepsané hodnotě tolerance. V závislosti na použité metodě jedna kružnice plní funkci obalového prvku a druhá referenčního prvku.



Obrázek 1.3 - Obalová kružnice. ³

Střed C_1 kružnice A_1 náleží prvním dvěma soustředným kružnicím, střed C_2 kružnice A_2 náleží druhým dvěma soustředným kružnicím.

Příslušné radiální vzdálenosti kružnic jsou r_1 a r_2 , z obrázku plyne, že

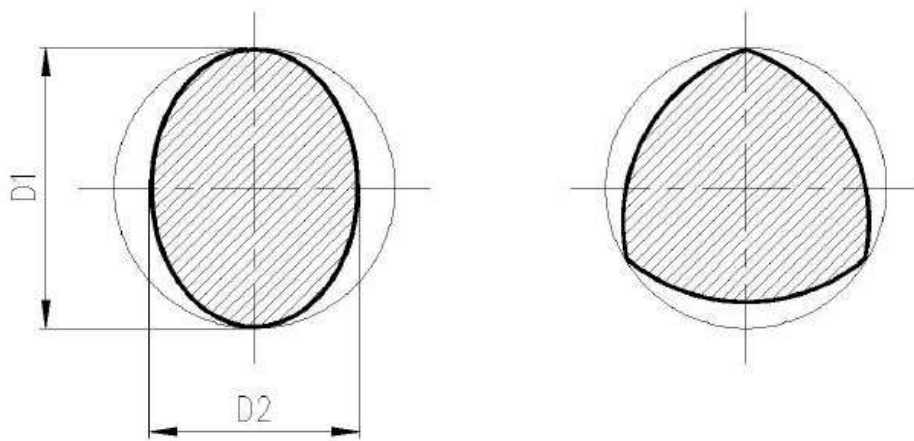
$$\Delta r_2 < \Delta r_1 \quad (1.1)$$

Správná poloha soustředných kružnic je ta, která je označena A_2 . Radiální vzdálenost r_2 může být nanejvýš rovna předepsané toleranci kruhovitosti. ³

Skutečné tvary ploch můžeme zjednodušeně rozdělit do dvou skupin:

- a) oválnost,
- b) hranatost.

Pokud má rotační plocha po svém obvodu určitý počet hran pak se jedná o hranatost. Nebo se rotační plocha může svým tvarem blížit elipse, poté mluvíme o oválnosti



Obrázek 1.4 - Odchylka oválnosti a hranatosti. ⁶

1.1.3 Příčiny vzniku geometrických odchylek

Odchylku od ideálního geometrického tvaru ovlivňují tyto faktory:

- obráběcí stroj,
- obrobek,
- nástroj,
- prostředí.

Obráběcí stroj má z výše uvedených faktorů největší vliv na odchylku od ideálního geometrického tvaru. Má na tom podíl zejména:

- odchylka polohy osy rotace a vodících ploch obráběcího stroje (rovnoběžnosti),
- chvění stroje,
- pružné deformace stroje.

Obrobek může ovlivnit odchylku tvaru jen z části, a to:

- uvolněním zbytkových napětí,
- smrštění po obrábění,
- nehomogenitou materiálu,
- tepelným ovlivněním,
- stárnutím.

Nástroj má především vliv na drsnost obráběných ploch, vzhledem k:

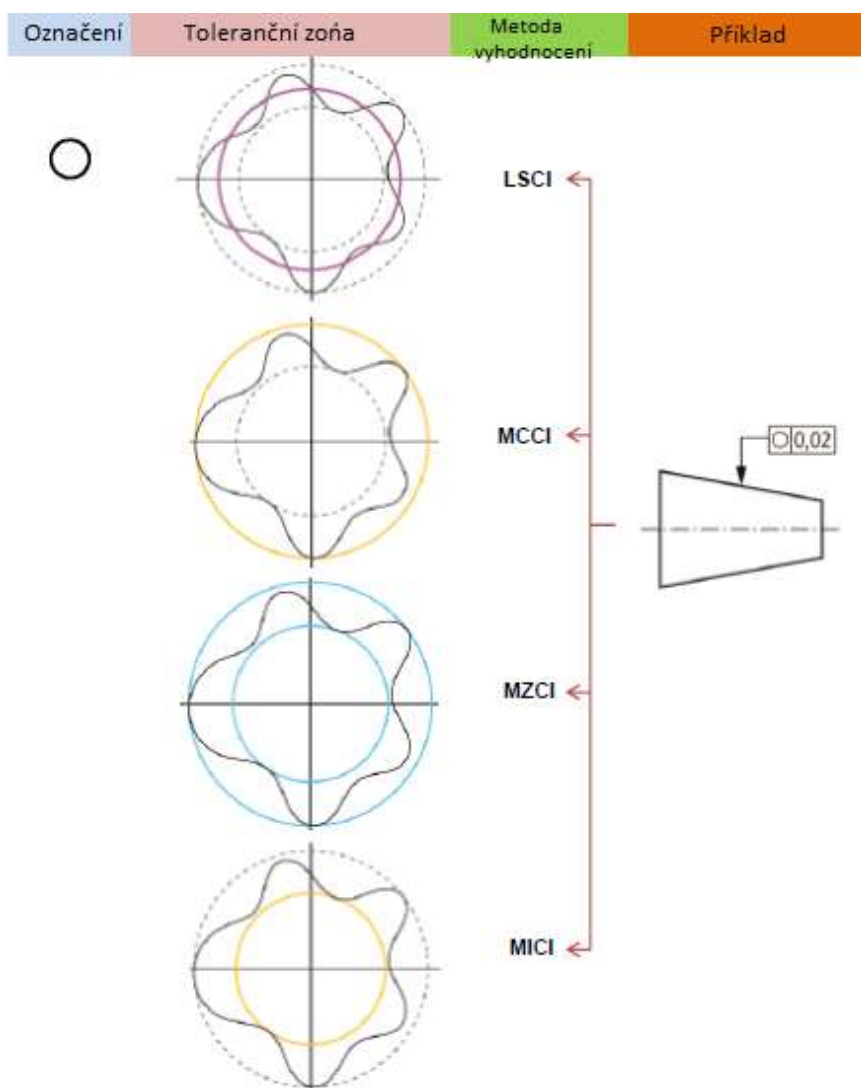
- opotřebení,
- geometrii (poloměru hrotu),
- posuvu.

Prostředí má také význam při ovlivnění odchylky od ideálního geometrického tvaru:

- chvěním, přenášeným z obráběcích strojů vyskytující se v blízkém okolí,
- chvěním, přenášeným z okolní dopravy, hlavně těžkých nákladních automobilů a městské hromadné dopravy,
- změnou okolní teploty.

Všechny tyto uvedené faktory jsou původem odchylek od ideálního geometrického tvaru. ⁴

Na vyhodnocení odchylek kruhovitosti používáme tyto metody ¹:



Obrázek 1.5 - Metody k vyhodnocení kruhovitosti ¹

- **Gauss (LSCI – střední kružnice nejmenších čtverců)** – referenční kružnice je přeložena přes snímaný profil metodou nejmenších čtverců. Tato metoda je nepatrně ovlivněna vybočením profilu.

- **Nejmenší opsaná kružnice (MCCI)** – referenční kružnice je nejmenší možná kružnice opsaná kolem snímaného profilu. Používá se pro hodnocení vnějších povrchů.
- **Čebyšev (MZCI – nejmenší radiální vzdálenost)** – referenční zóna je tvořena dvěma soustřednými kružnicemi, které zachycují snímaný profil v co nejmenším rozdílu svých poloměrů.
- **Největší vepsaná kružnice (MICI)** – referenční kružnice je největší možná kružnice vepsaná do snímaného profilu. Používá se pro hodnocení vnitřních povrchů.

Pozor na odlišnost! – pozor na odlišnost metod, které používáme na vyhodnocení odchylek kruhovitosti např. **LSCI** (platí pro kruhovitost) a válcovitosti **LSCY** (platí pro válcovitost). ¹

2 Měřicí metody odchylek kruhovitosti

Při měření kruhovitosti jsou velice významnými faktory především:

- co nejmenší geometrické odchylky od ideálního tvaru,
- kvalita povrchu,
- drsnost.

V případě, že daná součást tyto podmínky nesplňuje, může se stát, že bude kolidovat v sestavě s ostatními dílci a bude budit vibrace, které mohou dále vést k únavě a k deformaci některého z dílců. Z tohoto důvodu se při výstupní kontrole a měření klade velká pozornost. Nejen že nám udává velikost odchylek, ale zároveň nám umožní získat informace ke zlepšení technologického postupu výroby.

Odchylka kruhovitosti má také důležitý význam u výroby hřídel s dosedacími a vodícími plochami, u valivých ložisek a celkově u všech rotačních součástí.

Měření můžeme provádět na:

- konvenčních strojích (tyto stroje jsou určeny speciálně pro měření kruhovitosti),
- na souřadnicových měřících strojích neboli CMM.

2.1 Spojitá metoda

Jedná se o nepřetržitý kontakt mezi snímacím elementem a měřenou součástí, v tomto případě nedochází k přerušení měřící operace a ani k žádným odskokům měřící sondy. Tyto metody dělíme na ⁵:

- absolutní,
- relativní,
- skenovací.

2.1.1 Absolutní metoda

Jedná se o metodu měření poloměru a je významná vysokou přesností měření. Využívá se převážně u konvenčních měřících přístrojů při měření spojitou metodou za použití dotykových nástrojů.

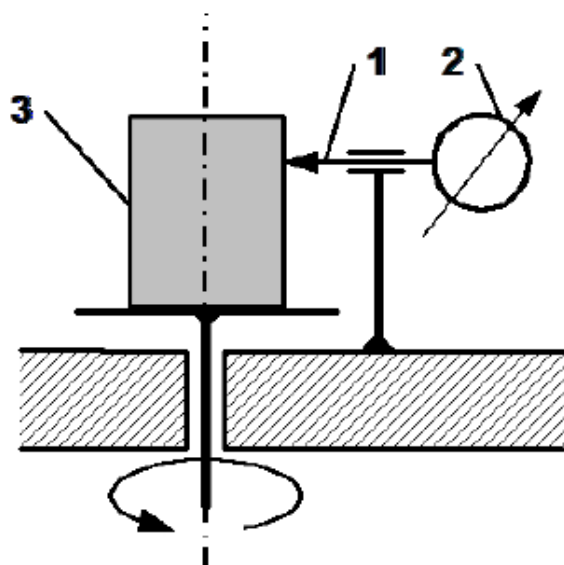
Absolutní metody dělíme na:

- a) Metodou s rotačním stolem (obrázek 2.1)
- b) Metodou s rotačním vřetenem (obrázek 2.2)
- c) Metodou rotující součástky mezi hroty (obrázek 2.3)

a) Metoda s rotačním stolem

Jde o zařízení, které je schopné velice přesně početně i graficky uvést výsledek měření kruhovitosti, a to s přesností až $0,1 \mu\text{m}$ ve většině případech i vyšší.

Je to proces, při kterém je měřená součást pevně ustavena na rotující stůl, ale sama nerotuje. Je velice nutné velmi přesně vycentrovat a vystředit osu měřené součástky s osou rotace stolu. Rotační stůl s ustavenou součástkou rotuje kolem své osy, kde je umístěn dotyk ve směru radiálním, který spojitě měří.



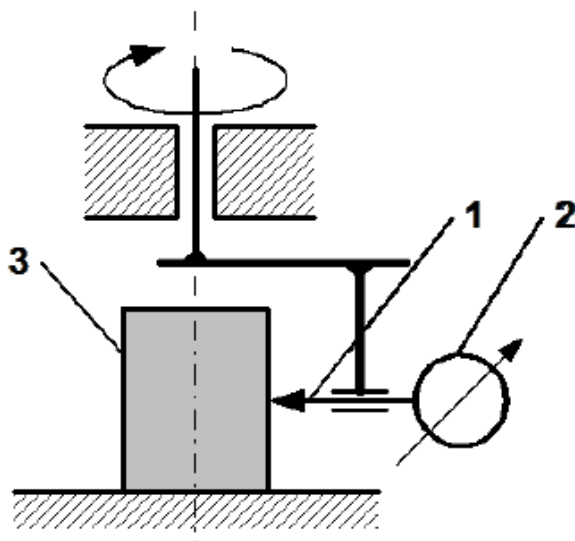
Obrázek 2.1 - metoda s rotačním stolem

1 – měřící dotyk, 2 – měřící přístroj, 3 – měřená součást ⁵

b) Metoda s rotačním vřetenem

Jedná se o velice podobnou metodu měření jako předchozí uváděná metoda s rotačním stolem. Přesnost měření i její výsledky jsou velice podobné. Ustavení součástky je i v tomto případě velice důležité z toho důvodu, aby nedošlo k excentrickému vyosení od osy rotace vřetena.

Součást je ustavena a kruhovitost je v radiálním směru snímána spojitým dotykem.

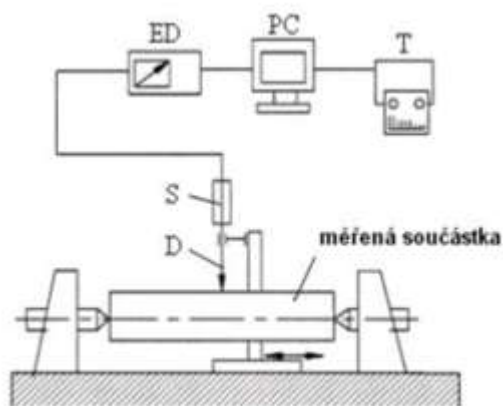


Obrázek 2.2 - metoda s rotačním vřetenem

1 – měřící dotyk, 2 – měřící přístroj, 3 – měřená součást⁵

c) Metoda rotující součástky mezi hroty

V tomto případě je součástka ustavena mezi hroty, které se s ní otáčejí. Ve směru radiálním je umístěn dotyk, který měří spojitou metodou kruhovitost. Jedná se o nejjednodušší absolutní metodu měření.



Obrázek 2.3 - Metoda rotující součásti mezi hroty.⁷

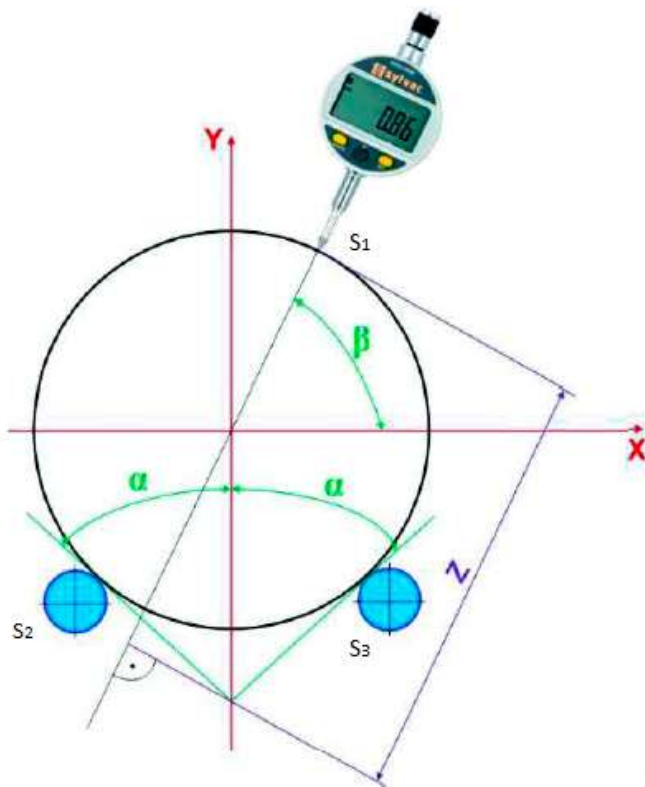
2.1.2 Relativní metoda

Princip metody spočívá v porovnání zjištěné veličiny ke zvolené etalonové hodnotě. Důvodem velkého zájmu o tuto metodu je především z toho důvodu, že je všeobecně snadno dostupná, výhodu nachází také v rychlosti měření, hromadné kontrole a také možnosti uplatnění mikropočítačů v měřící technice. U této metody měření rozlišujeme

body:

- opěrné (základní),
- body snímání.

Polohu výše uvedených bodů vzhledem k souřadnému systému určují uhly α a β (obrázek 2.4)



Obrázek 2.4 - Princip měření odchylky kruhovitosti relativní metodou. ⁸

S_1 – měřený bod, $S_{2,3}$ – body podepření, Z – měřená vzdálenost, 2α – úhel mezi tvořícími čarami opěrných bodů, β – úhel mezi směrem pohybu snímacího doteku a osou x . ¹

Relativní metoda se dále dělí na:

- tříbodovou metodu symetrickou,
- tříbodovou metodu nesymetrickou,
- dvoubodovou metodu.

Tříbodová metoda symetrická

Metoda je užívána k měření součástí, které mají lichý počet nepravidelností a u kterých je možnost měření vnitřních i vnějších profilů. U součástí s většími průměry můžeme měřit metodou obrácenou, kdy se měřící zařízení otáčí (obrázek 2.5 a)) a měřená součást zůstává v klidu. Vzhledem k tomu, že můžeme měřit lichý počet nepravidelností,

tak se pro výpočet skutečné odchytky stanoví součinitel $K_n = (0 \leq K_n \leq 2,73)$.

Měření lze uskutečnit ve dvou verzích:

- v přímé verzi - $\beta = \frac{\pi}{2}$ (viz obr. 8. b)),
- v obrácené verzi - $\beta = -\frac{\pi}{2}$. Používají se úhly $\alpha = 30^\circ, 36^\circ, 45^\circ, 54^\circ, 60^\circ$.

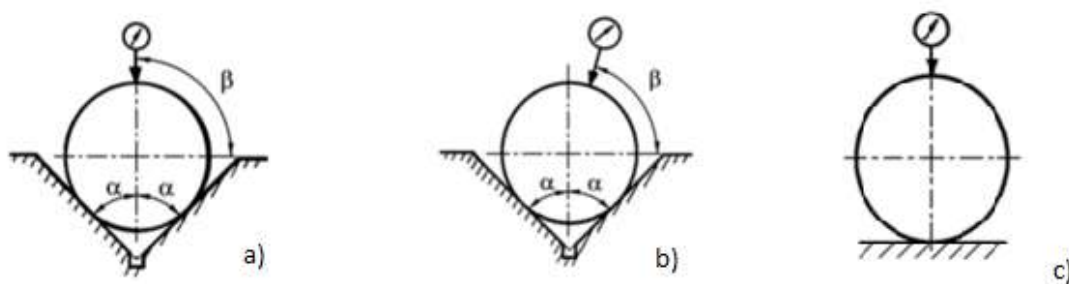
Tříbodová metoda nesymetrická

Tuto metodu spojují výhody jak metody dvoubodové, tak i metody tříbodové symetrické a umožňuje měření všech případů odchylek kruhovitosti (obrázek 2.5, b)). Lze uskutečnit měření vnitřních i vnějších profilů. Měření lze uskutečnit ve dvou verzích:

- v přímé verzi - $(0 \leq \beta < \alpha, \alpha < \beta < \frac{\pi}{2})$
- v obrácené verzi - $(-\frac{\pi}{2} < \beta < -\alpha - \frac{\pi}{72}, -\alpha + \frac{\pi}{72} < \beta < 0)$.

Dvoubodová metoda

V tomto případě se jedná o velmi jednoduchou a nejrychlejší metodu měření kruhovitosti, avšak je to na úkor její přesnosti. Měření se provádí v kterémkoli místě průřezu po obvodu kruhového tvaru. Měření se provádí na univerzálních měřicích přístrojích (obrázek 2.5, c)) a je používána pro měření profilů, které mají sudý počet nepravidelností např. (hranolovitost $k = 4$, ovalita $k = 2$ apod.). Součástky, které mají lichý počet nepravidelností touto metodou nelze měřit. Pro výpočet skutečné odchytky se stanoví součinitel $K_n = 2$, kde zároveň platí vztahy: $2\alpha = \pi$, $\beta = \frac{\pi}{2}$, $\alpha = \beta$.⁸



Obrázek 2.5 - Relativní metody měření

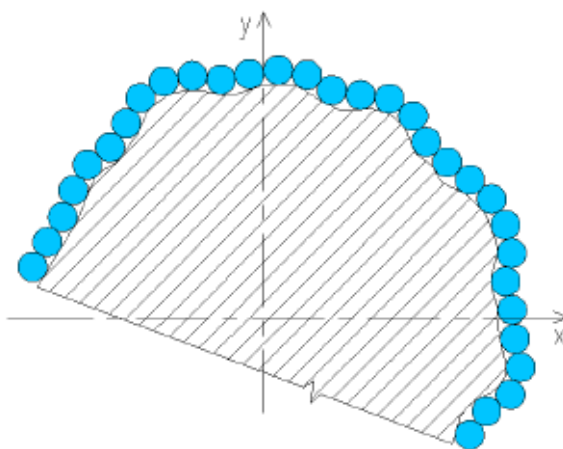
a) tříbodová metoda symetrická; b) tříbodová metoda nesymetrická; c) dvoubodová metoda⁸

2.1.3 Skenovací metoda

V tomto případě se jedná o nepřetržitý kontakt snímacího dotyku s měřenou částí při plynulém měření kontur a geometrických prvků s nejvyšší možnou hustotou bodů.

Snímací dotyk je v nepřetržitém kontaktu s danou měřenou součástí, aby vytvořil nejvíce reálný a co nejpřesnější tvar měřené součásti. Tento tvar je kontrolován dle výkresové dokumentace nebo za pomoci vytvořeného CAD modelu. Skenovací metodu je možno provést pouze u CMM zařízení, to však s podmínkou podpory konstrukčního zařízení – motorické skenovací hlavy. Není tedy pravidlem, že každé CMM zařízení je konstrukčně sestaveno pro režim skenování.

V současnosti je v praxi tato skenovací metoda velice využívanou záležitostí. Jedná se o přesnější měření než u metody nespojitě, jelikož se v případě měření spojitou metodou snímá celá délka obvodu měřené části pro vyhodnocení. Vyhodnocením následně získáme skutečný tvar, který dále porovnáváme s etalonovým vzorkem, případně můžeme použít termografickou mapu k vyhodnocení odchylek kruhovitosti.⁵



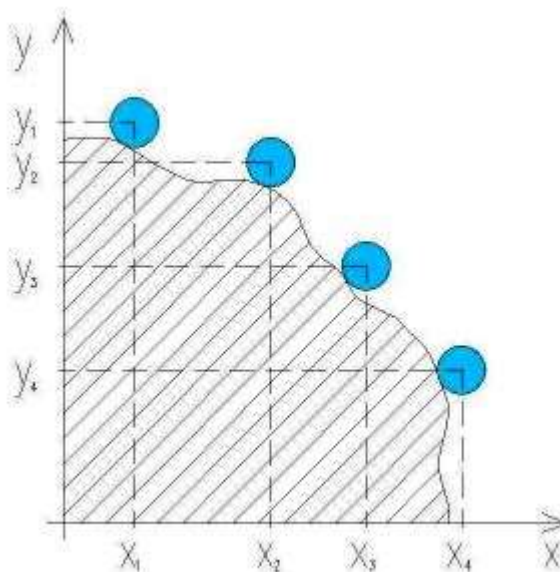
Obrázek 2.6 - Snímání bodů metodou skenovací.⁶

2.2 Nespojitá metoda (metoda diskrétní)

U nespojitě metody se nejedná o nepřetržitý kontakt měřícího elementu s měřenou součástí, ale jedná se o snímání předem přednastavených bodů.

K měření nespojitou metodou se používají souřadnicové měřící přístroje, ve kterých je již tato metoda součástí softwaru. K tomu, abychom mohli vyhodnotit kruhovitost je za potřebí snímat minimálně 3 body po obvodu dané součástky.

Z konstrukčního hlediska můžeme použít jak standartní pevnou snímací hlavu, nebo pro skenovací mód, avšak výhodou při použití pevné skenovací hlavy je větší přesnost.



Obrázek 2.7 - Snímání bodů nespojitou metodou ⁶

2.3 Normy spojené s kruhovitostí

Norma ČSN ISO 4292 (01 4412)

Tato norma vyobrazuje hodnocení úchylek kruhovitosti. Měření dvoubodovou a třibodovou metodou.

Norma obsahuje vždy definice ke konkrétní problematice, uspořádání a způsoby měření, také hodnocení chyb měření, podmínky měření, měřicí přístroje a další související normy. V samotném závěru norma obsahuje tabulky a konkrétní příklady. ⁹

Norma ČSN ISO 4291 (01 4411)

Jedná se o mezinárodní normu, která se zabývá metodami k vyhodnocení odchylky kruhovitosti měřením změn poloměru za použití dotykových nástrojů.

Norma uvádí typy přístrojů, doporučení k jejich použití a následnou kalibraci s ověřením vlastností. Norma také dále obsahuje hodnocení odchylky kruhovitosti od ideálního tvaru, odkazuje se na jiné související normy, dále obsahuje rozměry a druhy měřícího elementu, sílu doteku, odezvu přístroje a chyby přístroje. V závěru jsou v normě uvedené názorné příklady. ¹⁰

Norma ČSN P ISO/ TS 12181: 2005 (01 4151)

Název normy: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Kruhovitost.

Tato předběžná norma je české znění technické specifikace ISO/TS 12181:2003. Technická specifikace ISO/TS 12181:2003 má stav předběžné české technické normy.

Základní pojmy:

- „osa kruhovitosti (roundness axis) – osa prvku přiřazeného k integrálnímu prvku,
- kruhovitost (roundness) – vlastnosti kružnice,
- rovina kruhovitosti (roundness plane) – rovina kolmá k ose otáčení v celém rozsahu prvku“¹¹

Norma STN ISO 6318 a její definice

Norma ISO 6318: 1985 zavedená v ČSN ISO 6318: 1985 - – „Měření kruhovitosti“ – Termíny, definice a parametry kruhovitosti (01 4412) jsou přeložené z anglické normy ISO 6318:1985 - Measurement of roundness – Terms, definitions and parameters of roundness.

18

3 Chyby a nejistoty měření

3.1 Chyby měření

Veškeré prováděné měření je zatíženo souborem chyb, které nelze stoprocentně eliminovat. Takovéto chyby se podepisují na přesnosti měření a není možné je ve výstupním protokolu opomenout.

3.1.1 Hrubé chyby

Jedná se o chyby, které se vyskytují nejčastěji. Jsou způsobené na měřícím stroji, měřící osobou, měřidlem, chybným zapsáním výsledků, chybným zpracováním výsledků. Dokud se hrubé chyby neodstraní nelze pokračovat v měření. ⁵

3.1.2 Systematické chyby

Tyto chyby vznikají nevhodným přitlakem měřidla, nevynulováním měřidla nebo obecně špatným zacházením nebo nepřesným opotřebením měřícího přístroje. Hodnoty, které jsou ovlivněny systematickou chybou můžeme použít pouze tehdy pokud chyby nalezneme a následně je opravíme. Systematické chyby neznáme, jsou brány jako náhodné chyby, neboť nemají konkrétní hodnotu a jsou zahrnuty do nejistot měření.

⁵

3.1.3 Náhodné chyby

Tyto chyby jsou způsobené náhodným charakterem, co se velikosti a směru působení týče. Ve strojírenství mají náhodné chyby nejčastěji Gaussovo rozdělení hustoty pravděpodobnosti výskytu. Určení této chyby se provádí odečtením střední hodnoty od výsledné hodnoty měření. ⁵

3.2 Nejistoty měření

Nejistota měření je základním parametrem výsledku měření, který charakterizuje rozsah hodnot okolo výsledku měření a s určitou pravděpodobností zaručuje, že v tomto intervalu bude ležet reálná hodnota měřené veličiny. V nejistotách měření jsou také zahrnuty všechny jednotlivé náhodné chyby a nejistoty určení chyb systematických. Kvalitativně nahrazuje chybu měření.

Podstatou určování nejistoty je standardní nejistota značená jako „u“, jež udává hodnotu střední kvadratické odchylky a může být zapsána v absolutních hodnotách měřené veličiny.

Standardní nejistoty se podle způsobu vyhodnocení dělí na:

- nejistoty typu A,
- nejistoty typu B,
- kombinované nejistoty,
- rozšířené nejistoty.

3.2.1 Standardní nejistota typu A (u_A)

Hodnota této nejistoty se stanovuje z výsledků opakujících se měření statistickou analýzou množiny naměřených hodnot. Příčiny vzniku standardní nejistoty se považují za neznámé. Čím větší je počet měření, tím hodnota typu A klesá. Počet opakovaných měření pro statistické vyhodnocení by měl být minimálně 10, pokud by nesplňoval tuto podmínku, nebylo by možné kvalifikovaný odhad uskutečnit.¹⁴

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.1)$$

kde:

\bar{X} – aritmetický průměr [mm]

X_i – naměřená hodnota [mm]

n – počet naměřených hodnot [-]

3.2.2 Standardní nejistota typu B (u_B)

Výsledná hodnota nejistoty typu B, se určuje z jednotlivých zdrojů nejistot, které jsou identifikované pro konkrétní měření a jejich hodnoty nezávisí na počtu opakovaných měření.

$$u_B(X) = \sqrt{\sum_i u_{Bi}^2} \quad (3.2)$$

kde:

u_{Bi}^2 – je součet kvadrátů všech zdrojů nejistot typu B. [-]

Vlivy, které přispívají k nejistotě měření typu B, můžeme dělit do následujících skupin:

- měřený objekt (hodnota a typ odchylky tvaru, vlnitost, drsnost, rozměr, materiál, hmotnost),
- prostředí měření (teplota, vlhkost, nečistoty, vibrace),
- měřící zařízení (osy zařízení, hmotnost, snímací systém, software na měření a vyhodnocení),
- strategie měření (metoda měření, počet rozložení měřených bodů, použití filtru),
- obsluha měřícího zařízení (plánování, pořádek a čistota, upevnění, nastavení).

Vlivy prostředí na měření

Hlavní složkou prostředí, která má největší vliv na měření je teplota a její kolísání. U CMM souřadnicových měřících strojů určuje ideální provozní teplotu právě výrobce měřícího stroje. Dalšími aspekty, které mohou mít vliv na průběh měření jsou například: vibrace, vlhkost vzduchu, částice nečistot.

Vlivy měřeného objektu

Vliv obrobku se nedá zevšeobecnit, je to dáno tím, jaký byl použit materiál na jeho výrobu a také do značné míry tím, jakým způsobem byl obroben (např. pokud se obrobek soustruží a je upnut ve sklíčidle, vykazuje jiné odchylky tvaru než při broušení mezi hroty).

Vlivy měřícího zařízení

Každé měřící zařízení má i své nedostatky, které se berou v úvahu při stanovení přesnosti určitého měřícího zařízení. Těmito nedostatky mohou být například: nepřesnost výroby jednotlivých funkčních elementů, nepřesnost montáže mechanismů a převodových systémů, deformace. Tyto nežádoucí vlivy se eliminují ověřováním a kalibrací měřících zařízení.¹⁴

3.2.3 Kombinovaná standardní nejistota (u_c)

Tato nejistota se stanovuje jako geometrický součet standardní nejistoty typu A (u_A) a nejistoty typu B (u_B).

$$u_c(X) = \sqrt{u_A^2(X) + u_B^2(X)} \quad (3.3)$$

kde:

X – náhodná proměnná.

[-]

3.2.4 Rozšířená standardní nejistota (U)

Uvedená nejistota definuje interval přibližně kolem výsledku měření, ve kterém se s určitou pravděpodobností nachází výsledek měření. Určuje se jako součin standardní nejistoty „ u “ a koeficientu rozšíření „ k “

Pro normální rozdělení se koeficient rozšíření „ k “ volí v rozmezí intervalu $\langle 2,3 \rangle$, když volíme $k=2$, tak je úroveň spolehlivosti 95 % a pokud zvolíme $k=3$, tak se úroveň spolehlivosti zvýší na 99,7 %.¹⁴

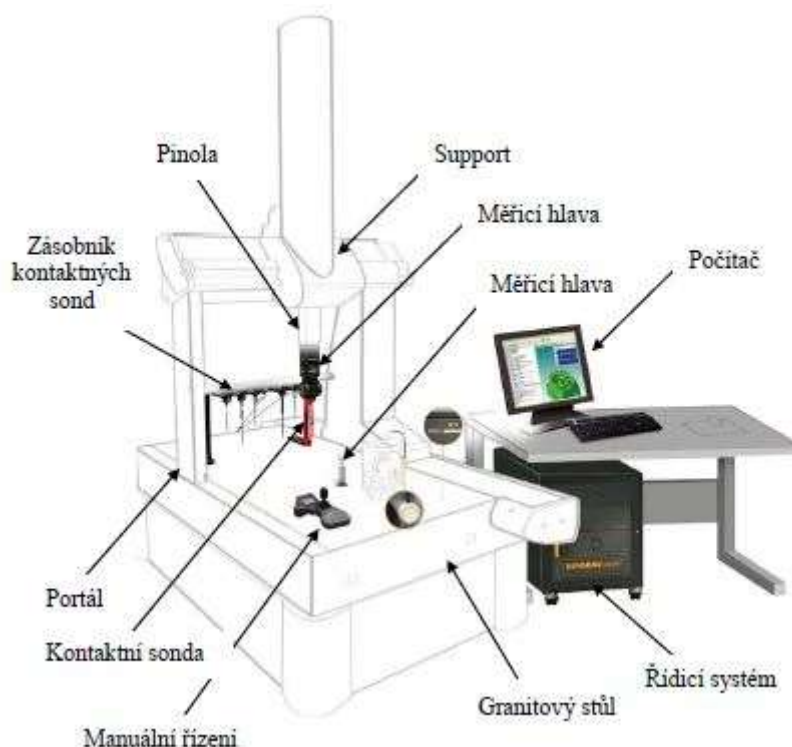
4 Souřadnicové měřicí stroje (CMM)

Souřadnicové měřicí stroje svým příchodem sehrály velice důležitou úlohu v oblasti průmyslových odvětvích včetně letectví, dále také elektroniky, automobilového průmyslu, farmaceutického průmyslu a dalších. Díky své univerzálnosti a flexibilitě patří k nejrychleji se vyvíjejícím měřicím prostředkům.¹⁴

Jedná se o souřadnicové měřicí stroje (CMM – Coordinate Measuring Machine). Zařízení je určeno k měření geometrických vlastností různých objektů a zařízení, používaných v montážních a výrobních procesech.

Základním principem je zjišťování souřadnice X, Y a Z jednotlivých bodů objektu. Tyto body jsou zjišťovány pomocí sondy, která je umístěna ručně (operátorem) nebo automaticky pomocí počítače.¹³

Stroje CMM pracují na základě kartézského souřadného systému, základním principem tohoto systému je měření tří na sebe kolmých os k zjištění souřadnic obrobku. Souřadnicové měřicí stroje jsou vytvořeny nejen proto, aby vyhodnotily výsledek, ale dokážou také naměřené hodnoty porovnat a následně určit, jestli se výsledek nachází v tolerančním poli nebo ne.²⁰



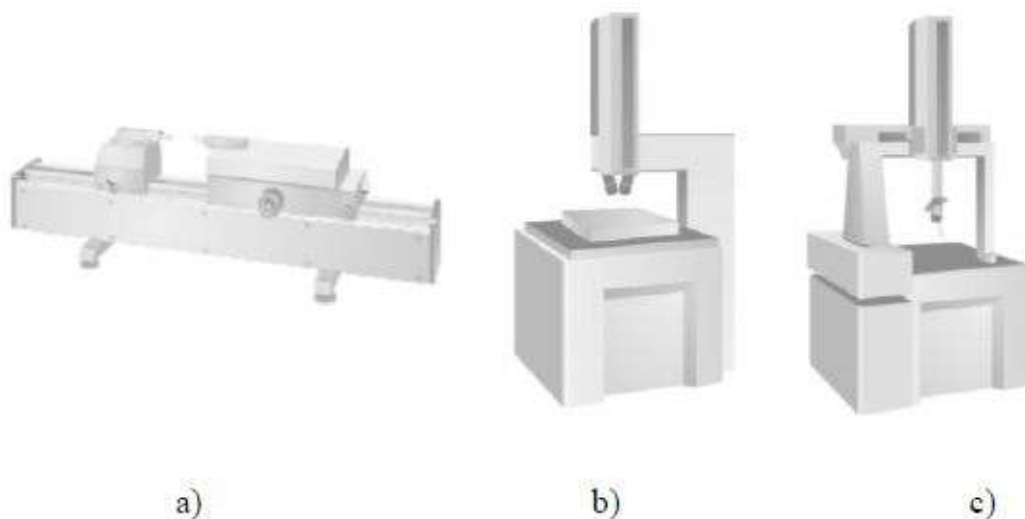
Obrázek 4.1 - Popis základních částí souřadnicového měřicího stroje.¹²

4.1 Typy CMM

Výroba souřadnicových strojů nabízí velkou škálu provedení, ať už se jedná o malé stolní přístroje, nebo naopak o velké mostové systémy. Použití těchto strojů je čím dál víc rozsáhlejší a jejich využití se stále rozvíjí. Nejčastější využití těchto strojů je při kontrole tvaru a rozměrů součástí.

4.1.1 Dělení strojů podle počtu souřadnicového měření:

- **Jednosouřadnicové měřicí stroje** – Výhodou tohoto stroje je, že se dopouští velmi malých chyb měřidla – od 0,6 až 6 μm v celém rozsahu, a to i u součástí velkých rozměrů, naopak nevýhodou u těchto strojů je, že mohou měřit pouze v ose x. (Obrázek 4.2 a))
- **Dvousouřadnicové měřicí stroje** – tyto stroje umožňují měřit rozměry ve dvou vzájemně kolmých osách x a y v jedné rovině. Při 2D měření používáme mikroskopy, profilprojektory. (Obrázek 4.2 b))
- **Třísouřadnicové měřicí stroje** – nepochybnou výhodou těchto strojů je měření ve třech navzájem kolmých osách x, y, a z v prostoru. To vede k přesnému a rychlému měření i složitějších součástí. (Obrázek 4.2 c))



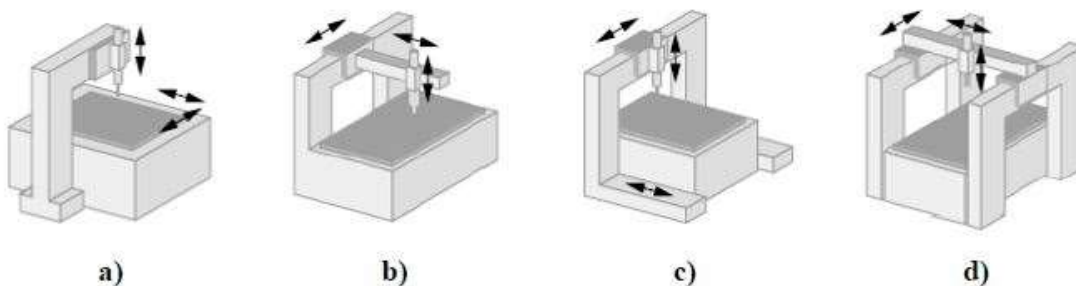
Obrázek 4.2 - Typy CMM ¹⁴

Každý CMM stroj se skládá z dílčích, navzájem propojených podsystémů ¹⁴:

- pohonný systém (mechanická část),
- odměřovací systém,
- snímací systém včetně systému pro výměnu snímačů,
- počítač,
- software,
- řídicí systém.

Podle normy ČSN EN ISO 10 360 – 1 se CMM zařazuje do čtyř základních geometrických skupin:

- a) stojanový typ,
- b) výložníkový typ,
- c) portálový typ,
- d) mostový typ.



Obrázek 4.3 - Typy souřadnicových měřicích strojů

a) stojanový typ, b) výložníkový typ, c) portálový typ, d) mostový typ. ¹³

Stojanový (sloupový) typ – Měřený předmět se upíná na stůl, který se pohybuje ve směru osy „x“ a „y“ a měřicí pinola se pohybuje ve směru osy „z“. Stroje tohoto typu se řadí mezi nejpresnější. Tento stojanový typ se vyznačuje:

- tuhou úhlovou konstrukcí,
- dobrým přístupem k měřenému předmětu.

Výložníkový typ – Měřený předmět se upíná na stůl, přičemž měřicí pinola na výložníku se pohybuje ve směru osy „y“ a kolmo v ose „x“, v ose „y“ se mění vyložení pinoly od vodící plochy, proto je nutné vyvažování. Výložníkový typ se vyznačuje:

- má poměrně krátkou osu „y“ z důvodu tuhosti tělesa,

- je zde dobrý přístup k měřenému předmětu – vhodný pro dlouhé a úzké součásti.

Portálový typ – Patří k nejrozšířenějším CMM pro střední a velké rozsahy měření.

Vyznačují se:

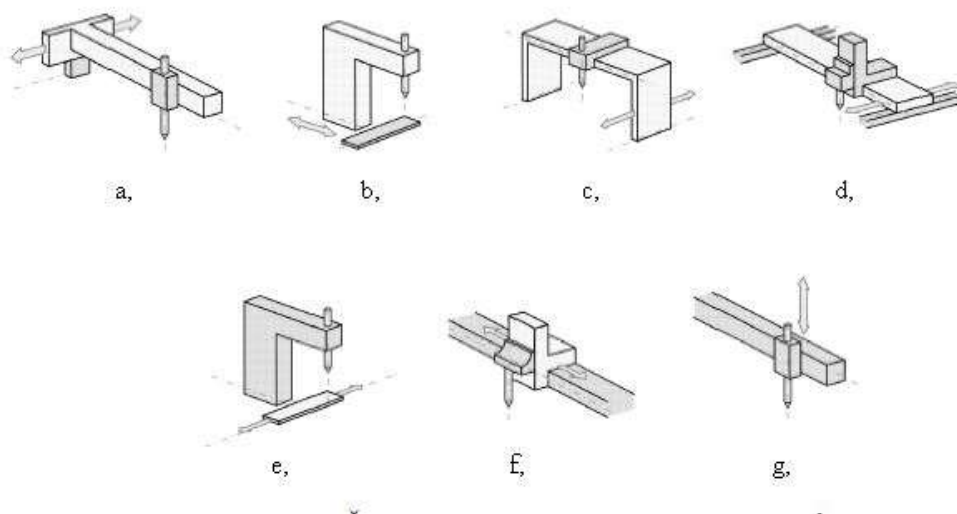
- velkou tuhostí, tím umožňují vysokou přesnost měření.

Portálový typ může být ve dvou provedeních:

- pevný portál,
- pohyblivý portál.

Mostový typ – Charakterizuje se svou velikostí a má největší rozsahy měření. Používá se na měření nadrozměrných součástek. Nejčastěji se využívá v automobilovém a leteckém průmyslu.¹⁴

Pro **CMM** jsou typické tyto části uvedené v následujícím obrázku, které jsou také typické pro výrobní stroje (obrázek 4.4)



Obrázek 4.4 - Části souřadnicových měřících strojů

a) výložník, b) stojan, c) most, d) portál, e) posuvný stůl, f) suport, g) smýkadlo¹⁴

4.1.2 Snímací systémy

Snímací systém je nezbytnou součástí celého měřicího systému stroje. Funguje jako spojení mezi strojem a měřeným vzorkem. Také se používá ke snímání polohy bodů a následnému vyhodnocení zaznamenaných bodů na obrobku v souřadném systému CMM.

Snímací systémy se dělí podle počtu os, ve kterých mohou pracovat, a to na: lineární (1D), rovinné (2D) a trojrozměrné (3D) operační systémy.

Snímací systémy CMM se dělí na dotykové a bezdotykové. V současnosti se u CMM nejčastěji používají dotykové nebo optické snímací systémy. ²⁰

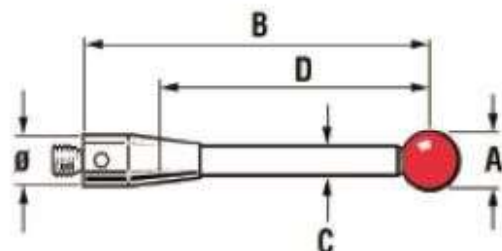
Snímací systém je připojený na pinole a skládá se ze:

- systém výměny snímací hlavy a snímacího dotyku,
- prodloužení snímací hlavy a snímacího dotyku,
- snímací hlavy a snímacího dotyku. ⁸

4.1.3 Měřící dotyky

Snímací dotyky jsou součástí měřicího systému, který je zprostředkovatelem kontaktu mezi dílcem a sondou a způsobuje sepnutí v mechanismu sondy. Signál, který je přitom generovaný, umožňuje zaznamenat souřadnice nasnímaného bodu.

Typ a rozměr dotyku (obrázek 4.3) závisí na snímaném prvku. Nejdůležitějšími vlastnostmi dotyku je tuhost dotyku a dokonalý tvar měřící kuličky. ¹²



A – průměr kuličky,
 B – celková délka,
 C – průměr dřívku,
 D – efektivní činná délka (EWL).

Obrázek 4.3 – Rozměry dotyku ¹²

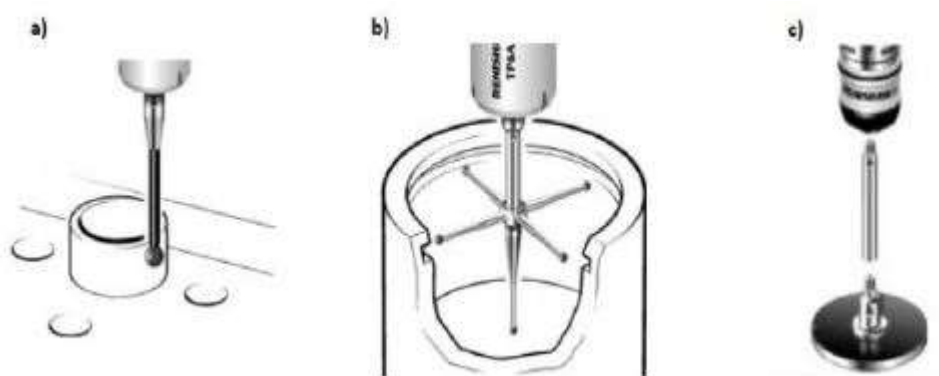
Pokud chceme dosáhnout co nejvyšší přesnosti, musíme dodržet následující zásady a pravidla pro výběr dotyku a měření:

- volit co nejkratší dotyk (aby nedocházelo k průhybu),
- volit co nejmenší počet prodlužovacích nástavců (každý spoj dotyku je zdrojem nepřesnosti),
- volit co největší průměr kuličky (volbou větší kuličky se volí větší průměr stopky dotyku a tím se zvýší tuhost dotyku).

4.1.4 Typy dotyků

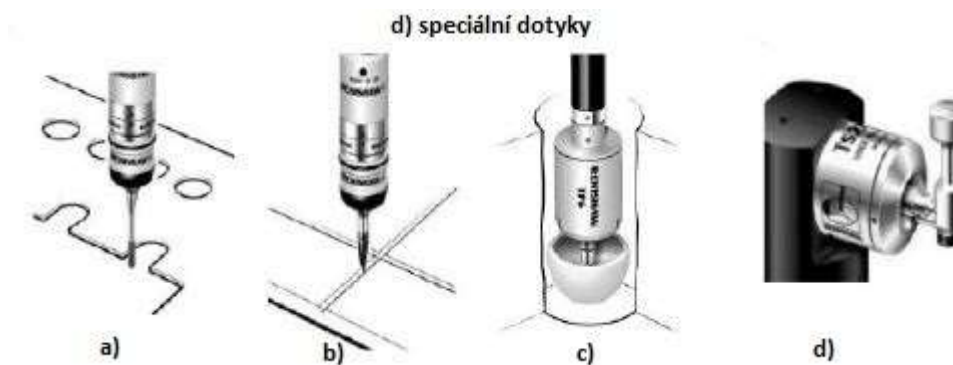
Typy dotyků dělíme na:

- a) **přímé** – nejjednodušší tvar, skládá se z přesné kuličky a stopky,
- b) **hvězdicové** – používá se pro snímání složitých prvků, nebo otvorů,
- c) **diskové** – využívá se pro snímání zápchů a drážek, kde se nedá použít hvězdicový dotyk,
- d) **dotyky pro speciální účely** – dělí se na: válcový dotyk, špička, dutá keramická polokoule, dotyk na ustavení nástrojů. ¹²



Obrázek 4.4 - Základní typy dotyků

a) přímý dotyk, b) hvězdicový dotyk, c) diskový dotyk ¹⁴



Obrázek 4.5 - Dotyky pro speciální účely

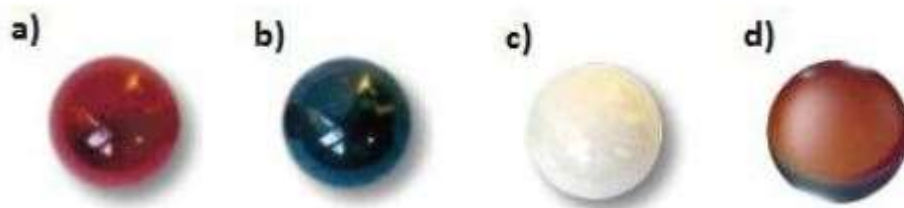
a) válcový dotyk, b) špička, c) dutá keramická polokoule, d) dotyk na ustavení nástrojů ¹⁴

4.1.5 Materiály kuliček:

- a) **rubín** – nejvíce používaný ze všech materiálů u většiny aplikací,
- b) **nitrid křemíku** – má podobné vlastnosti jako rubín. Materiál je velmi tvrdý a odolný proti opotřebení. Pokud ale přijde do kontaktu s ocelovými povrchy, vykazuje

značnou míru opotřebení otěrem,

- c) **oxid zirkoničitý** – jedná se o keramický materiál s velkou tvrdostí a se stejným opotřebením jako má rubín,
- d) **diamant** – tento materiál je ze všech nejlepší, protože poskytuje nejpřesnější a nejekonomičtější měření. Vyznačuje se extrémní tvrdostí a hladkým povrchem kuličky, která udržuje opotřebení tření na minimální hranici.

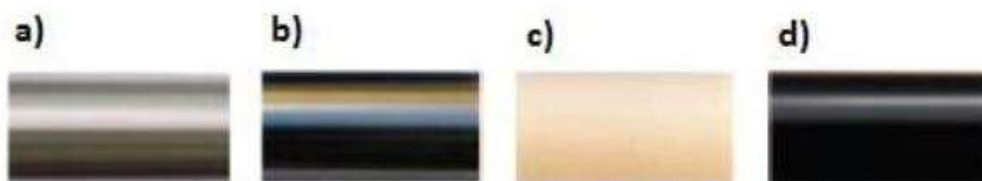


Obrázek 4.4 - Materiály kuliček

a) rubín, b) nitrid křemíku, c) oxid zirkoničitý, d) diamant.¹²

4.1.6 Materiál stopky (dříku) měřícího dotyku:

- a) ocel,
- b) karbid wolframu,
- c) keramika,
- d) uhlíková vlákna.



Obrázek 4.5 – Materiály pro stopky dotyků

a) ocel, b) karbid wolframu, c) keramika, d) uhlíková vlákna¹²

5 Experimentální část

V experimentální části bylo našim cílem zkoumat a porovnat závislost dané naměřené hodnoty na drsnosti povrchu a metodě měření kruhovitosti. Experimentální měření bylo provedeno pod dohledem vedoucí bakalářské práce Ing. Lenky Čepové, Ph.D. na souřadnicovém měřícím stroji od firmy Wenzel – WENZEL LH 65 X3M PREMIUM s operačním systémem Metrosoft QUARTIS R16. Měření probíhalo v laboratoři při konstantní teplotě okolí a měřicího zařízení $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ na fakultě strojní, Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie Vysoké školy báňské v Ostravě.



Obrázek 5.1 – souřadnicový měřící stroj WENZEL LH65 X3M Premium

5.1 Výroba vzorků

Celkem pět vzorků (obrázek 5.5) na experiment bylo vyrobeno z jednoho kusu tyčového profilu z ložiskové oceli 100Cr6 na stroji DMG Mori Seiki NLX 2500/700 (obrázek 5.2). Ty byly následně obrobeny na osazené válečky o průměru měřené části 60 mm a o průměru upínací části 65 mm. Řezné parametry k dosažení požadované drsnosti povrchu jsou popsány v tabulce 5.2 a použité řezné nástroje jsou vyobrazeny na (obrázek 5.3 a obrázek 5.4).

Tabulka 5.1 – Vlastnosti použitého materiálu ¹⁹

Materiál	ČSN 42 0002 14 109								EN 100Cr6				
	Chemické složení								Mechanické vlastnosti				
	C [%]	Cr [%]	Cu [%]	Mn [%]	Ni [%]	P [%]	S [%]	Si [%]	R _m [MPa]	Re min [MPa]	HB	A (5) [%]	E [GPa]
min.	0,9	1,3		0,30				0,15	610 - 725	440	max. 225	18	213
max.	1,1	1,65	0,25	0,50	0,30	0,027	0,03	0,35					

Tabulka 5.2 – Řezné parametry

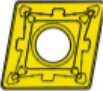
	$R_a =$ [μm]	$R_{a \text{ skut.}} =$ [μm]	v_c [m/min]	f [mm]	a_p [mm]
1.	0,236	0,2	160	0,05	0,5
2.	0,893	0,8	160	0,15	0,5
3.	1,148	1,6	180	0,20	0,5
4.	3,177	3,2	180	0,42	0,5
5.	5,743	6,3	180	0,9	0,5

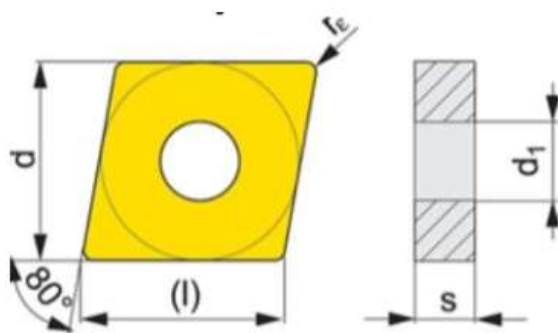
Vzorky byly vyrobeny na CNC soustruhu DMG Mori Seiki NLX 2500/700 (obrázek 5.3).



Obrázek 5.2 - Soustruh DMG Mori Seiki NLX 2500/700 ¹⁵

Tabulka 5.3 – Parametry břitové destičky od firmy Dormer & Pramet. ¹⁶

Utvařeč	ISO	l	d	d ₁	s	Rádus	Posuv na ot.		Hloubka řezu	
						r _ε	f _{min}	f _{max}	a _{p min}	a _{p max}
	CNMG 120408E-M	12,9	12,7	5,16	4,76	0,8	0,10	0,6	0,3	6,0

Obrázek 5.3 – Břitová destička ¹⁶Obrázek 5.4 – Soustružnický nůž ¹⁶

Drsnosti zkoumaných vzorků

Po obrobení a následném očištění vzorků bylo provedeno změření drsnosti povrchu za použití digitálního přístroje Mitutoyo 401, který byl upnut do revolverové hlavy stroje.

Po povrchu osoustružených vzorků přejelo klouzátko, které zaznamenalo hodnoty a na displeji přístroje vyhodnotilo výsledky.

Pro co nejpresnější naměření drsnosti povrchu byly užity parametry z tabulky 5.4.



Obrázek 5.5 – Obrobené vzorky s odlišnou drsností povrchu

Tabulka 5.4 – Použité parametry pro měření drsnosti přístrojem Mitutoyo 401 ²¹

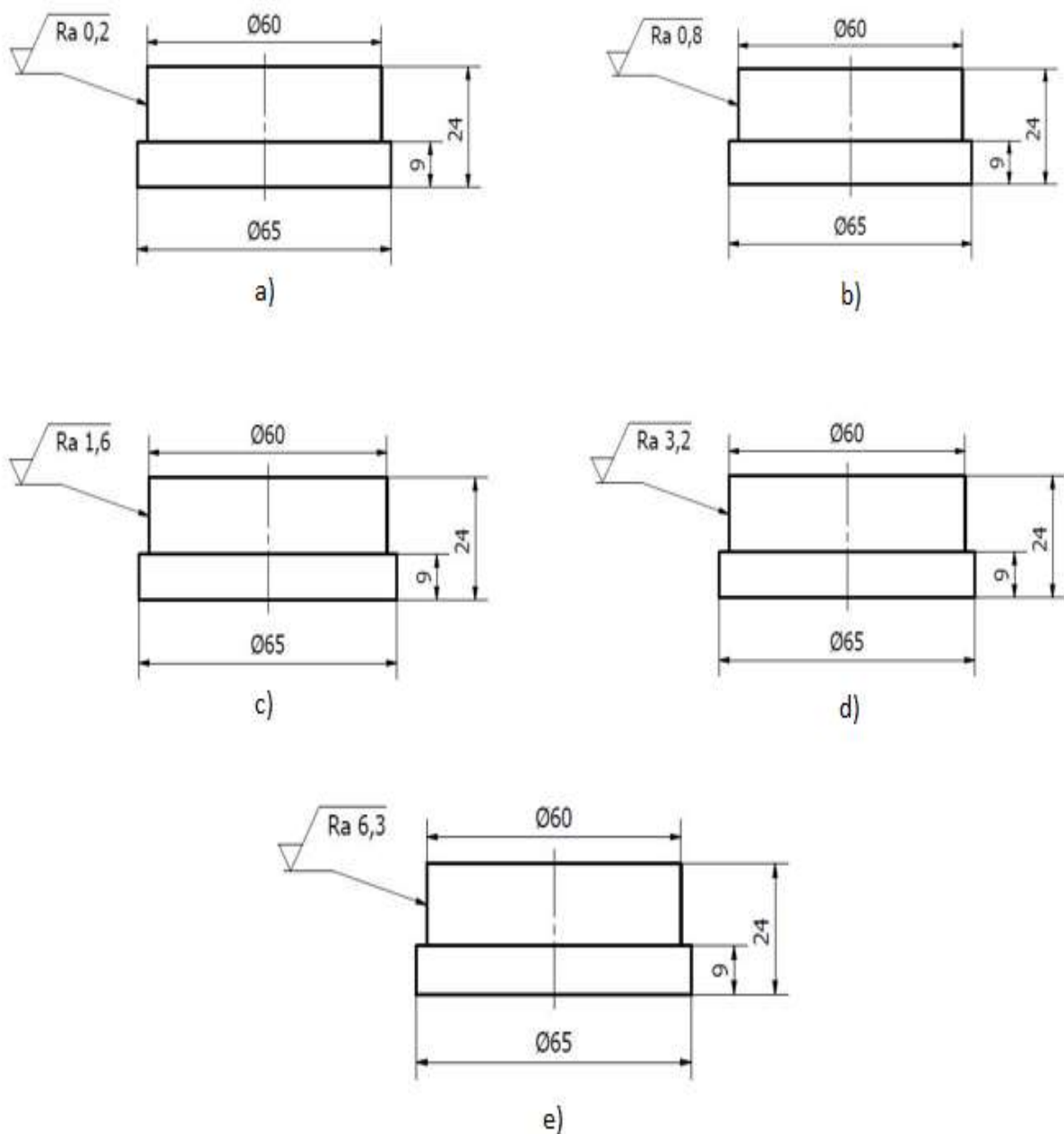
Ra [μm]	λ _c [mm]	lr/ln/lt [mm]	r _{sp max} /Δx _{max} [μm]
0,10 – 2,0	0,8	0,80/4,00/4,80	5/0,5
2,00 – 10	2,5	2,5/12,5/15,0	5/1,5



Obrázek 5.6 – Měření drsnosti povrchu na přístroji Mitutoyo 401



Obrázek 5.7 – Přístroj Mitutoyo 401



Obrázek 5.8 - Nákrasy měřených součástí

a) $Ra 0,2 \mu m$; b) $Ra 0,8 \mu m$; c) $Ra 1,6 \mu m$;

d) $Ra 3,2 \mu m$; e) $Ra 6,3 \mu m$

5.2 Parametry měřícího zařízení

Pro měření byl použit stroj **CMM WENZEL LH 65 – X3M Premium**:

Funkční plocha desky stroje v osách X/Y:

x = 850 mm

y = 1700 mm

Rozsah stroje v osách X/Y/Z: $x = 650 \text{ mm}$ $y = 1000 \text{ mm}$ $z = 500 \text{ mm}$ **Nejistota měření MPEe, podle ISO 10360-2 v provedení X3M Premium,
zvýšená přesnost:** $MPEe = 1,6 + (L/350) \text{ } \mu\text{m}$ $MPEp = 1,6 \text{ } \mu\text{m}$ **Otočná naklápěcí motorická hlava:**

PH10M (obrázek 5.9)

Měřicí skenovací sonda:

SP 25 M – modul 1

 $MPE_{thp} = 2,2 \text{ } \mu\text{m}$ (SP25)**Dotyky:**

1001 – průměr kuličky 2 mm s přesností po kalibraci 0,0013 mm (Obrázek 5.9)

Software:

Metrosoft QUARTIS R16

Měřicí hlava Renishaw PH10M (obrázek 5.7) disponuje 720 polohami s maximálním prodloužením 300 mm. Dotyk 1001 se skládá z ocelového dříku a rubínové kuličky o jejím průměru 2 mm.



5.3 Experimentální měření

Předtím, než započalo samotné měření na CMM stroji Wenzel LH 65 X3M Premium, proběhlo čištění všech pěti vzorků technickým lihem, dále byla změřena teplota granitové desky měřicího zařízení, vzorků a také teplota okolí, která měla být $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Následně došlo ke kalibraci snímací hlavy Renishaw PH10M a snímacího dotyku 1001 s ocelovým dříkem o délce $L = 35 \text{ mm}$ a rubínovou kuličkou o průměru 2 mm na referenční kouli o průměru 24,9990 mm (obrázek 5.13). Poté došlo k odebrání všech stupňů volnosti upnutím vzorku do sklíčidla a k zaměření snímací kuličky v souřadném systému. Zaměření probíhalo manuálně několika doteky rubínové kuličky po celém obvodu vzorku o průměru 60 mm v několika rovinách řezu, včetně zaměření čela. Finální měření probíhalo v hloubce 6 mm od zaměřeného čela skenovací a bodovou metodou. U skenovací metody bylo užito pět rozdílných parametrů a to: 1 mm/s; 2 mm/s; 5 mm/s; 10 mm/s; 20 mm/s kdy každý z uvedených parametrů byl použit pro deset měření. U bodové metody byly užity čtyři různé parametry měření a to: 4 body; 8 bodů; 16 bodů; 32 bodů a stejně tak každé měření těmito parametry proběhlo desetkrát. Každý vzorek byl v součtu měřen devadesátkrát. K vyhodnocení výsledku měření sloužila Gaussova metoda bez užití filtru k co nejpřesnějšímu zobrazení reálného tvaru odchylky kruhovitosti.



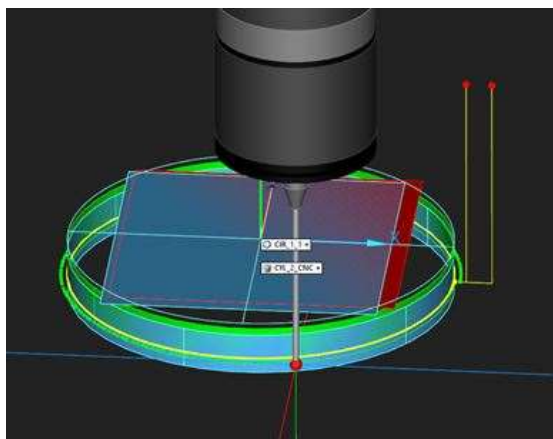
Obrázek 5.12 – Ustavená součást ve sklíčidle



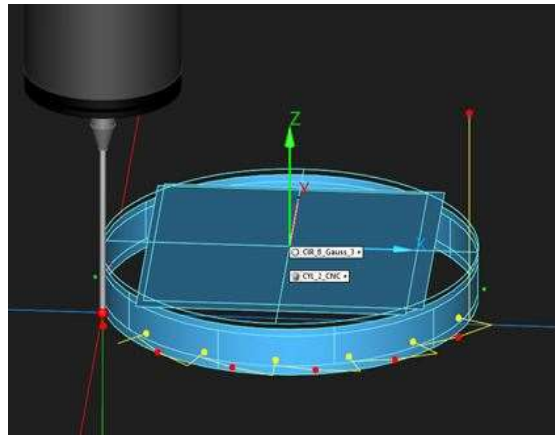
Obrázek 5.13 – Referenční koule

6 Grafické a numerické vyhodnocení

Finální výsledky byly vyhodnoceny a zaznamenány do protokolu, ze kterého vznikly následující tabulky a grafy. Všechny zaznamenané hodnoty odchylky kruhovitosti jsou uvedeny v tabulkách.



Obrázek 6.1 - Průběh měření skenovací metodou



Obrázek 6.2 - Průběh měření bodovou metodou

6.1 Výpočet výsledných hodnot

Všechny naměřené hodnoty, které jsou uvedené v tabulkách jsou odečteny z protokolu měření. K vyhodnocení byla použita Gaussova metoda bez použití filtrů. Jediné vypočtené hodnoty jsou rozpětí hodnot a aritmetické průměry.

Aritmetický průměr odchylky kruhovitosti:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

kde:

\bar{x} – aritmetický průměr hodnot [mm],

x_i – jednotlivé naměřené veličiny [mm],

n – počet měření [-].

Rozpětí naměřených hodnot:

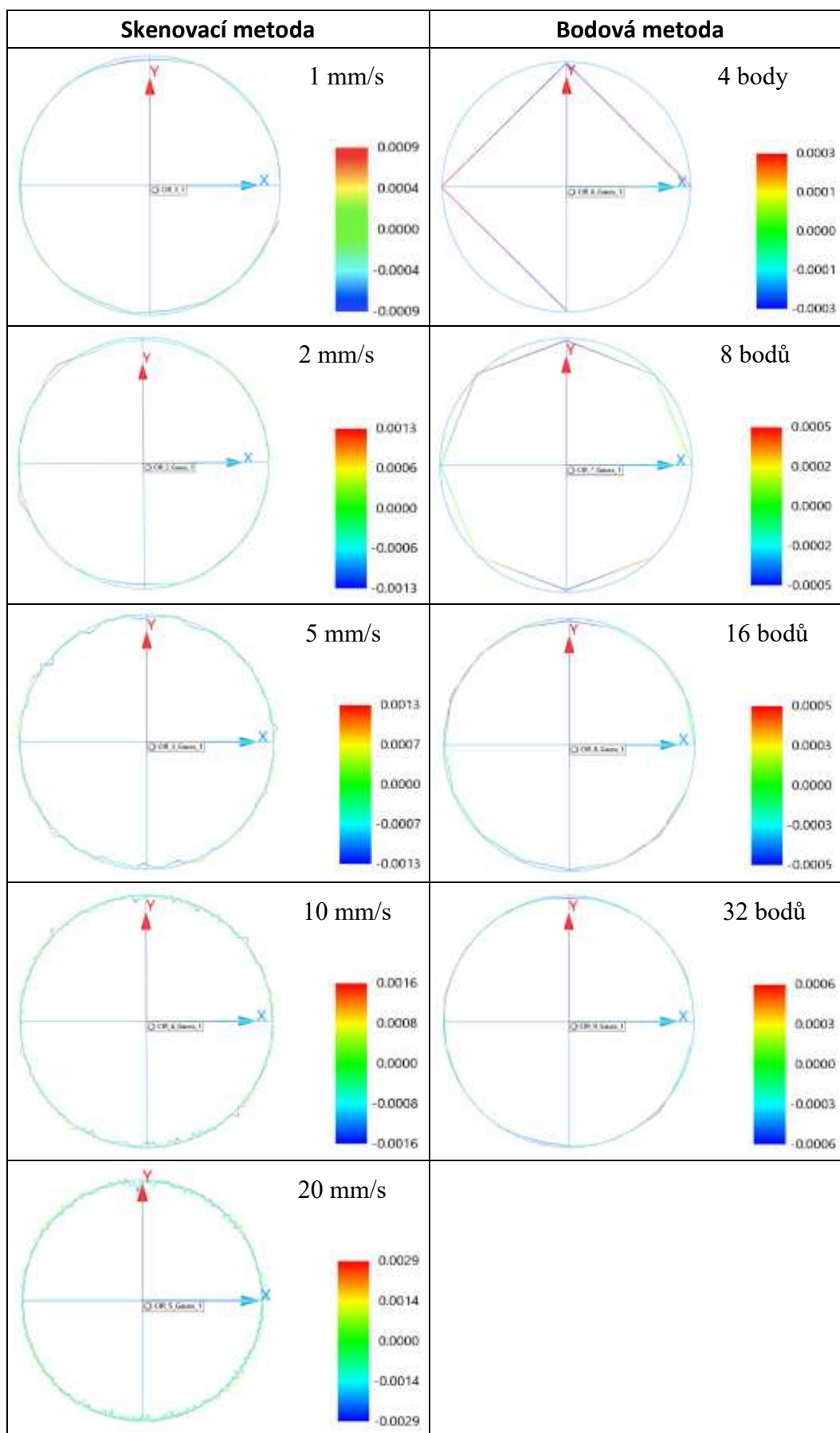
$$Roz. = Max._n - Min._n \quad (6.2)$$

kde:

Roz. – rozpětí hodnot v tabulce [μm]

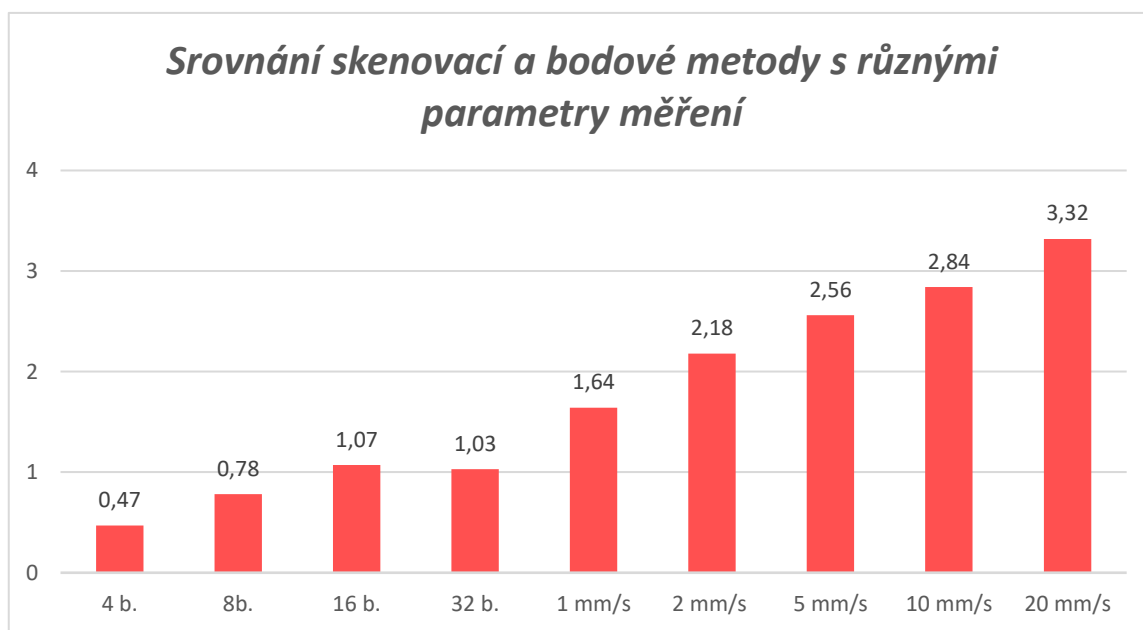
$Min._n$ – minimální hodnota v tabulce [μm]

$Max._n$ – maximální hodnota v tabulce [μm]

Tabulka 6.1 – Porovnání schémat skenovacích a bodových metod měření pro $R_a = 0,236 \mu\text{m}$ 

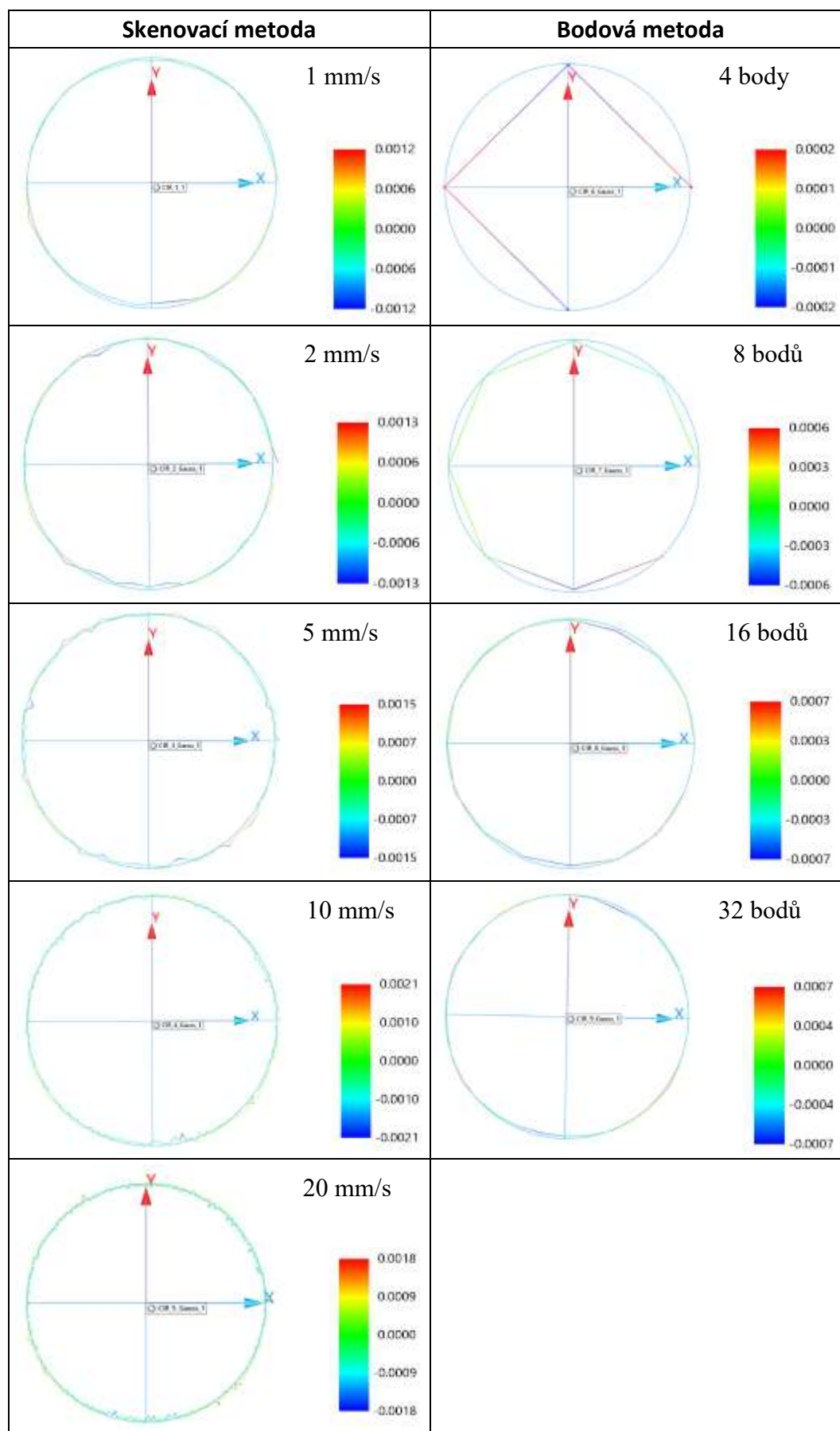
Tabulka 6.2 – Naměřené parametry odchyly kruhovitosti – $R_a = 0,236 \mu\text{m}$

Č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	\bar{x}	roz.
Bodová metoda												
4 b.	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,47	0,1
8 b.	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,9	0,8	0,7	0,8	0,8	0,78	0,2
16 b.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,0	1,1	1,0	1,2	1,07	0,2
32 b.	1,0	1,1	1,1	1,2	0,9	0,9	1,2	1,0	1,0	0,9	1,03	0,3
Skenovací metoda												
1000 $\mu\text{m/s}$	1,4	1,5	1,7	1,6	1,8	1,4	1,8	1,4	1,9	1,9	1,64	0,5
2000 $\mu\text{m/s}$	2,0	2,1	2,8	2,2	2,2	1,9	2,0	2,3	2,1	2,2	2,18	0,9
5000 $\mu\text{m/s}$	2,3	2,8	2,8	2,3	2,8	2,6	2,7	2,5	2,2	2,6	2,56	0,6
10 000 $\mu\text{m/s}$	3,0	2,7	3,0	2,9	2,9	2,9	2,7	2,6	3,0	2,7	2,84	0,4
20 000 $\mu\text{m/s}$	4,0	3,3	3,2	3,4	3,1	3,2	3,0	3,2	3,4	3,4	3,32	1



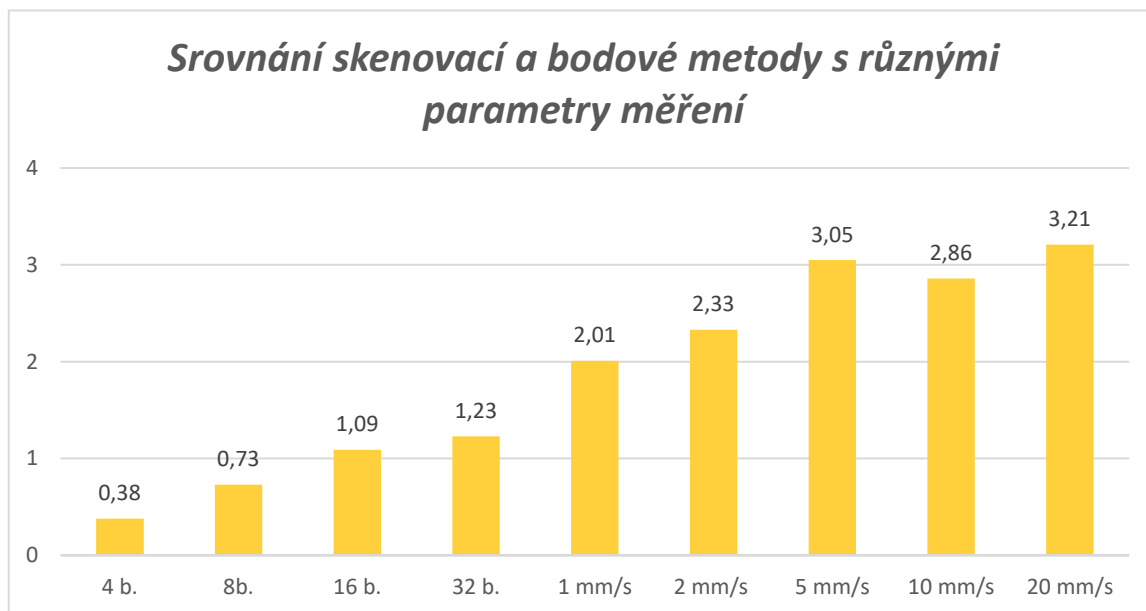
Graf 6.1 - Srovnání skenovací a bodové metody

Z výše uvedeného grafu vyplývá, že počet snímaných bodů u skenovací metody je lineárně závislý na zvětšující se odchylce kruhovitosti. Čím větší je počet snímaných bodů, tím větší je i přesnost měření. U bodové metody při měření 4 body byla naměřena nejmenší průměrná odchylka kruhovitosti $0,47 \mu\text{m}$ a naopak největší u měření 16 body a to $1,07 \mu\text{m}$. U bodové metody měření nebyl celý průběh lineárně závislý, jak můžeme vidět z grafu, může to být způsobeno například nežádoucím vlivem nečistot působících na vzorek v průběhu měření. Nejvyšší průměrná odchylka je u metody skenovací s rychlostí skenování 20 mm/s a to $3,32 \mu\text{m}$.

Tabulka 6.3 – Porovnání schémat skenovacích a bodových metod měření pro $R_a = 0,893 \mu m$ 

Tabulka 6.4 – Naměřené parametry odchylky kruhovitosti – $R_a = 0,893 \mu m$

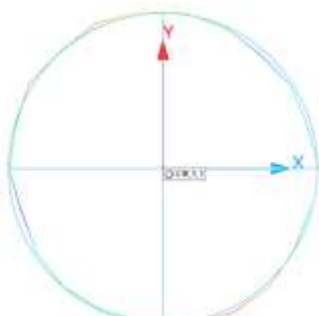
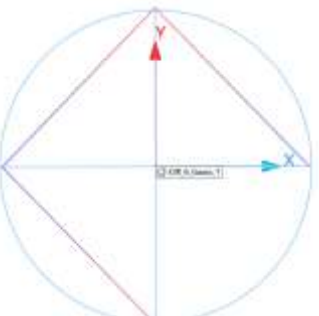

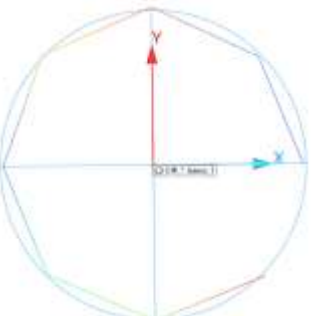
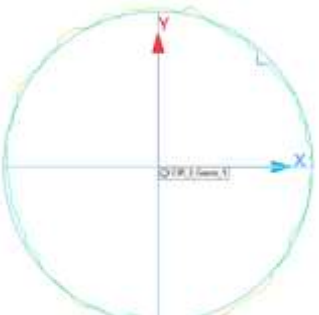
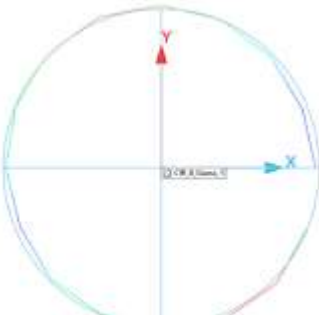

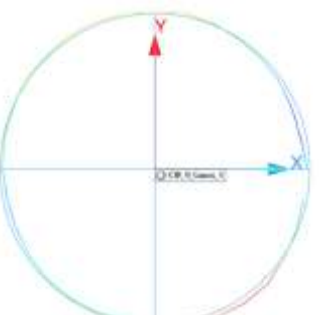

Č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	\bar{x}	roz.
Bodová metoda												
4 b.	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,5	0,38	0,2
8 b.	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,73	0,2
16 b.	1,0	1,0	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,09	0,2
32 b.	1,3	1,2	1,3	1,3	1,1	1,2	1,3	1,2	1,1	1,3	1,23	0,2
Skenovací metoda												
1000 $\mu m/s$	1,8	2,0	1,8	2,5	2,1	2,1	2,1	2,0	1,6	2,1	2,01	0,9
2000 $\mu m/s$	2,3	2,5	2,3	2,4	2,1	2,3	2,1	2,6	2,2	2,5	2,33	0,5
5000 $\mu m/s$	2,7	2,8	3,4	2,9	2,9	3,1	3,4	3,0	3,2	3,1	3,05	0,7
10 000 $\mu m/s$	3,2	2,9	2,9	3,2	2,8	2,9	2,6	2,5	2,7	2,9	2,86	0,7
20 000 $\mu m/s$	3,1	2,9	3,1	3,5	2,9	3,8	3,0	3,3	3,2	3,3	3,21	0,9



Graf 6.2 - Srovnání skenovací a bodové metody

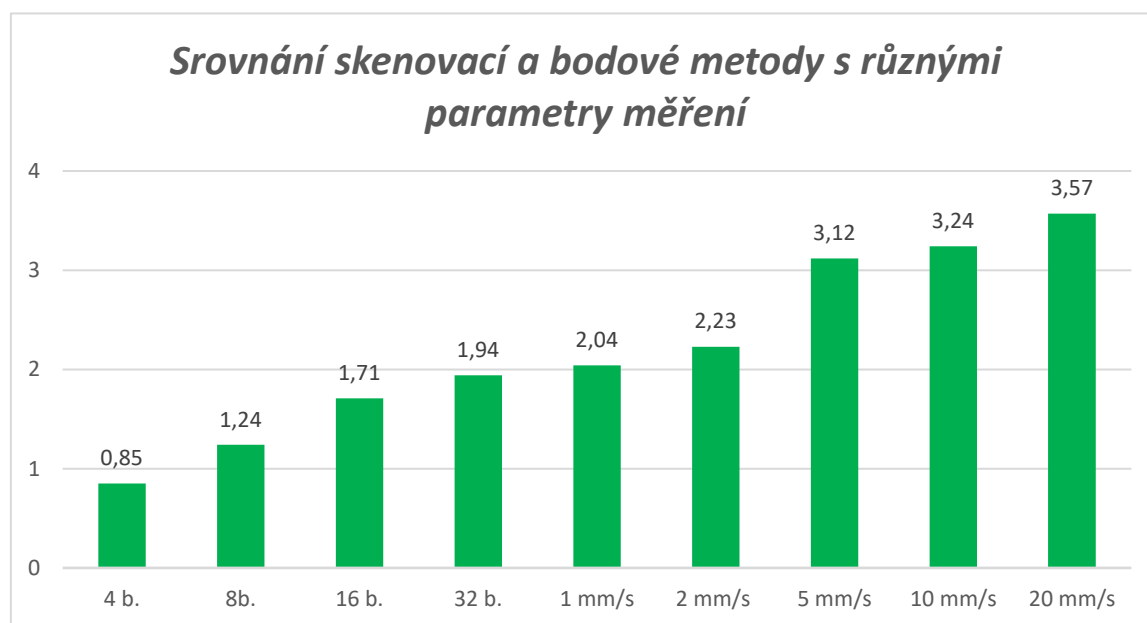
Podle výše uvedeného grafu nám u metody skenovací vykazuje největší odchylku kruhovitosti měření s rychlostí skenování 20 mm/s a to 3,21 μm naopak nejmenší u měření s rychlostí 1 mm/s a to 2,01 μm . U bodové metody byla největší odchylka naměřena u 32 snímaných bodů a to 1,23 μm a nejmenší u měření 4 body, ta vykazovala hodnotu odchylky 0,38 μm .

Tabulka 6.5 – Porovnání schémat skenovacích a bodových metod měření pro $R_a = 1,148 \mu\text{m}$

Skenovací metoda	Bodová metoda
 <p>1 mm/s.</p>	 <p>4 body</p>
 <p>2 mm/s</p>	 <p>8 bodů</p>
 <p>5 mm/s</p>	 <p>16 bodů</p>
 <p>10 mm/s</p>	 <p>32 bodů</p>
 <p>20 mm/s</p>	

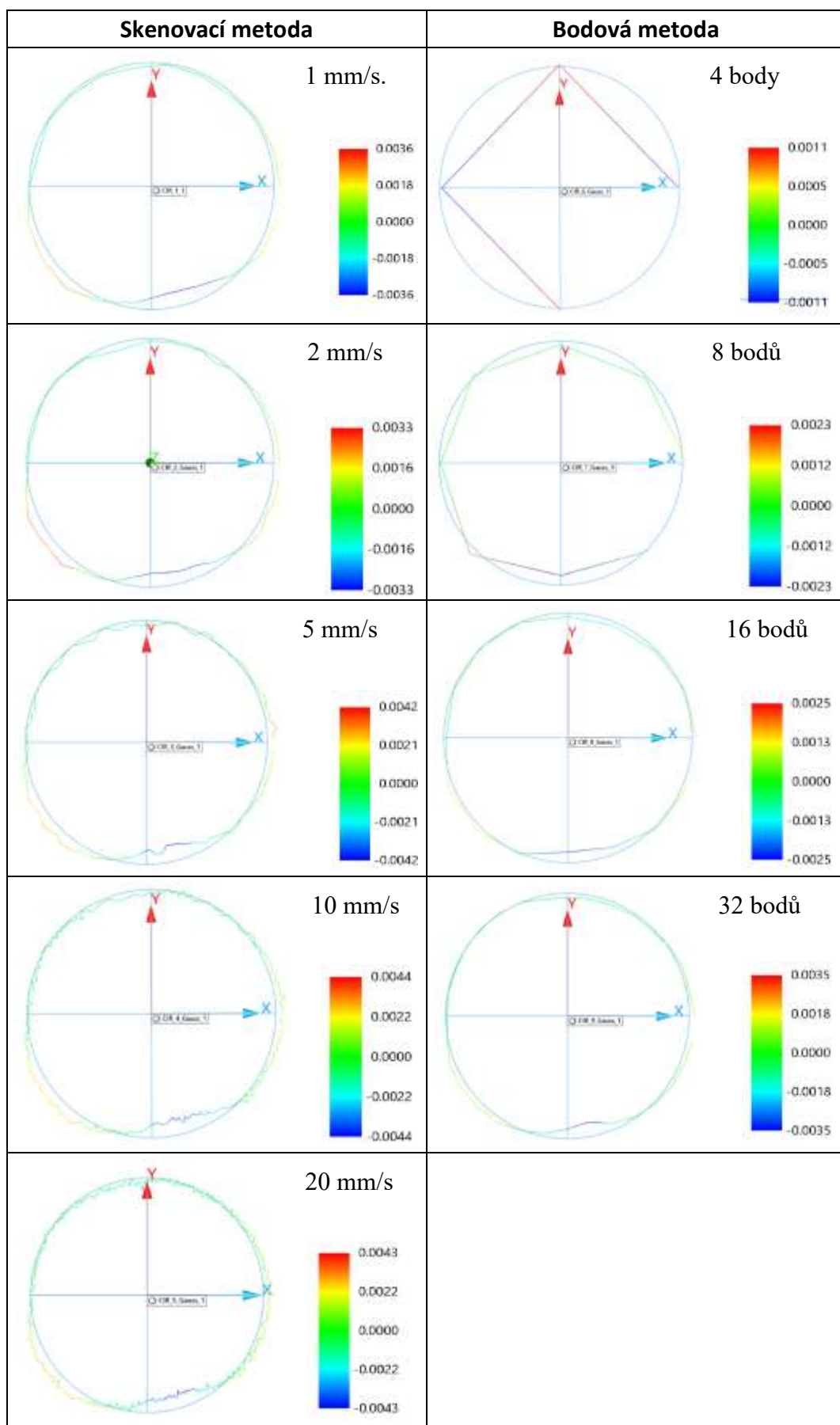
Tabulka 6.6 – Naměřené parametry odchylky kruhovitosti – $R_a = 1,148 \mu\text{m}$

Č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	\bar{x}	roz.
Bodová metoda												
4 b.	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,85	0,2
8 b.	1,2	1,2	1,2	1,3	1,2	1,1	1,5	1,2	1,3	1,2	1,24	0,4
16 b.	1,9	1,8	1,6	1,7	1,6	1,5	1,8	1,8	1,5	1,9	1,71	0,4
32 b.	1,9	2,0	1,9	1,8	1,9	2,0	2,0	1,9	2,1	1,9	1,94	0,3
Skenovací metoda												
1000 $\mu\text{m/s}$	2,1	1,8	1,5	2,0	3,0	2,3	2,1	2,3	1,5	1,8	2,04	1,5
2000 $\mu\text{m/s}$	2,1	2,1	2,1	2,4	2,3	2,1	2,2	2,4	2,1	2,5	2,23	0,4
5000 $\mu\text{m/s}$	3,5	3,0	3,4	2,8	2,9	2,9	3,4	3,3	3,1	2,9	3,12	0,7
10 000 $\mu\text{m/s}$	3,3	3,1	3,4	3,0	3,3	3,0	3,2	3,5	3,0	3,6	3,24	0,6
20 000 $\mu\text{m/s}$	3,8	3,3	3,7	3,5	3,7	3,7	3,8	3,3	3,3	3,6	3,57	0,5



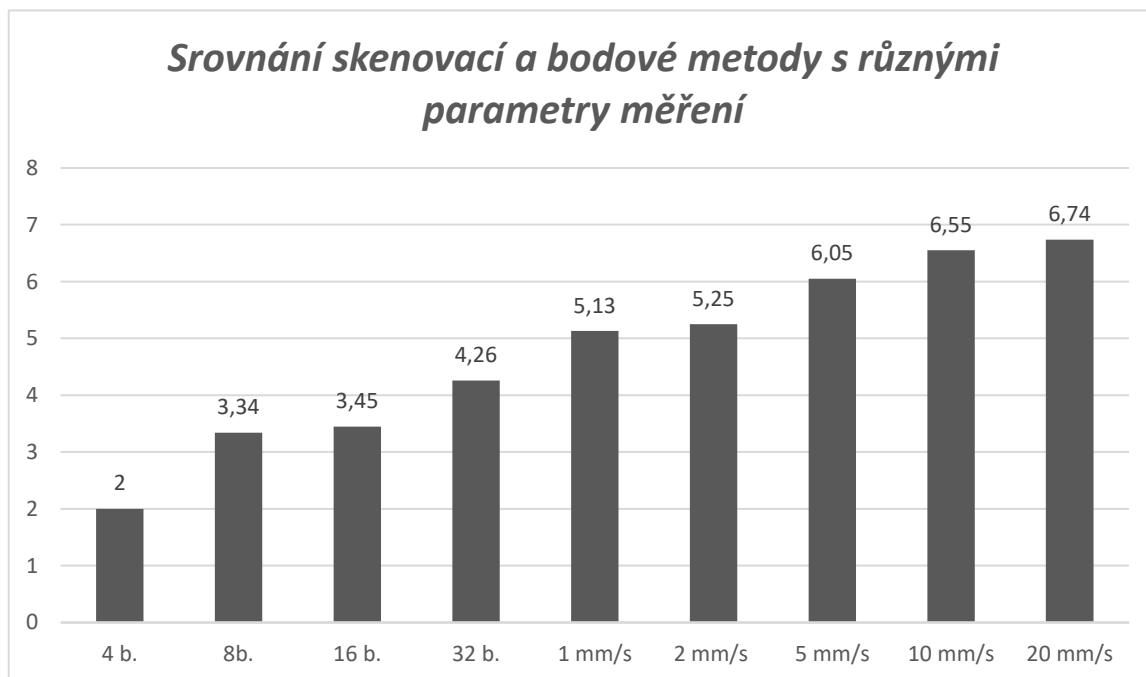
Graf 6.3 - Srovnání skenovací a bodové metody

U tohoto grafu můžeme vidět, že průběh bodové metody lineárně roste s rostoucím počtem snímaných bodů, nejvyšší hodnotu naměříme u měření 32 body, které vykazuje odchylku $1,94 \mu\text{m}$ a nejmenší u 4 bodové o hodnotě odchylky $0,85 \mu\text{m}$. U metody skenovací se tato závislost také projevuje. Největší odchylkou je hodnota $3,57 \mu\text{m}$ a vzniká u rychlosti skenování 20 mm/s .

Tabulka 6.7 – Porovnání schémat skenovacích a bodových metod měření pro $R_a = 3,177 \mu\text{m}$ 

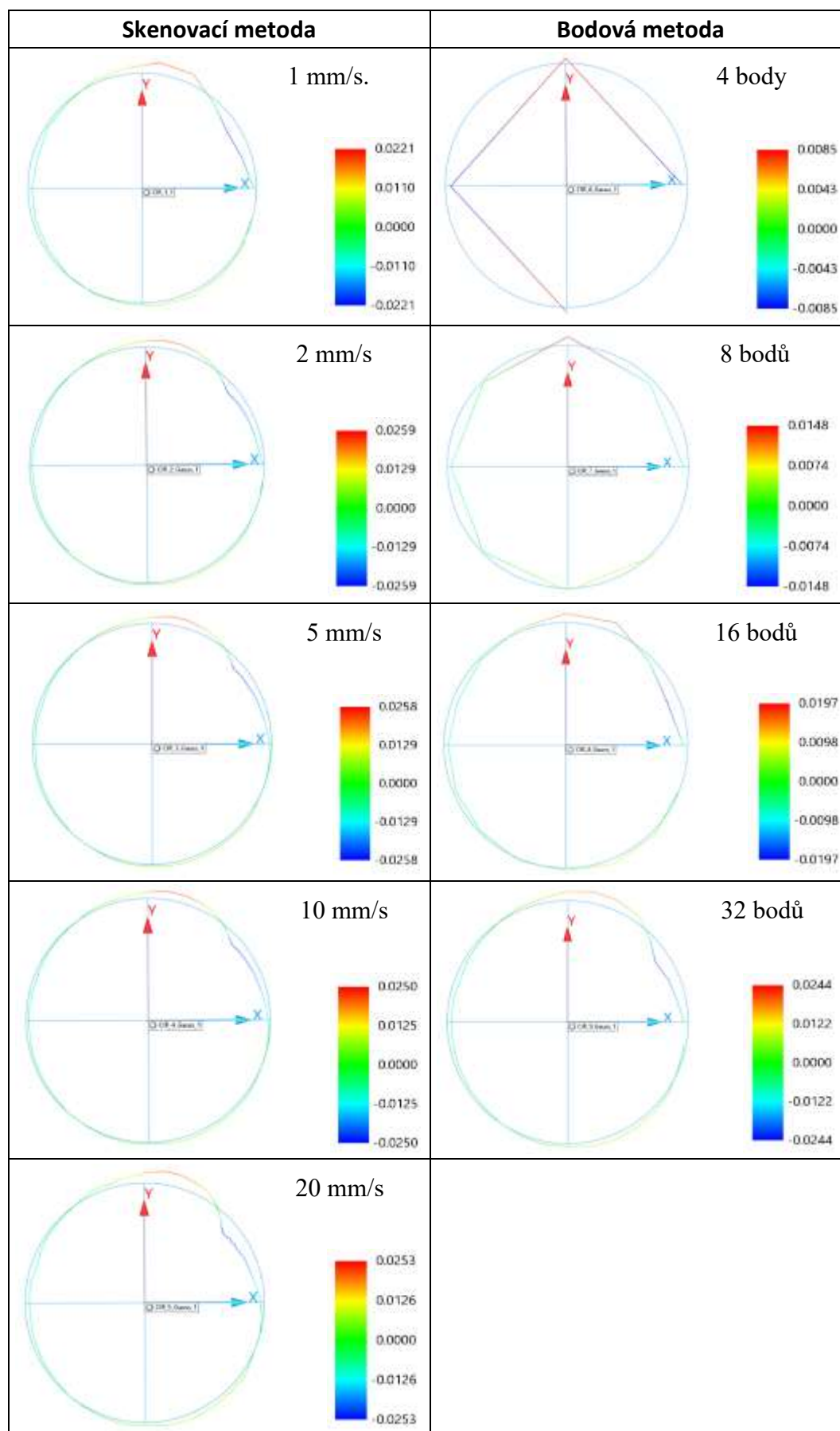
Tabulka 6.8 – Naměřené parametry odchyly kruhovitosti – $R_a = 3,177 \mu\text{m}$

Č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	\bar{x}	roz.
Bodová metoda												
4 b.	2,1	2,1	2,0	2,1	1,9	2,1	1,9	1,9	2,0	1,9	2	0,2
8 b.	3,3	3,4	3,4	3,4	3,2	3,4	3,3	3,4	3,3	3,3	3,34	0,2
16 b.	3,5	3,4	3,5	3,5	3,4	3,4	3,4	3,4	3,5	3,5	3,45	0,1
32 b.	4,3	4,2	4,3	4,2	4,3	4,4	4,2	4,3	4,1	4,3	4,26	0,3
Skenovací metoda												
1000 $\mu\text{m/s}$	5,2	5,0	5,0	5,0	5,1	5,3	5,4	5,3	5,1	4,9	5,13	0,5
2000 $\mu\text{m/s}$	5,4	5,2	5,7	5,1	5,5	5,1	4,9	5,2	5,3	5,1	5,25	0,8
5000 $\mu\text{m/s}$	6,1	6,2	5,9	6,0	6,3	5,8	5,7	6,2	6,1	6,2	6,05	0,6
10 000 $\mu\text{m/s}$	6,5	6,9	6,3	6,6	6,4	6,8	6,4	6,4	6,9	6,3	6,55	0,6
20 000 $\mu\text{m/s}$	6,7	7,0	6,9	6,6	6,4	6,7	6,7	6,8	6,8	6,8	6,74	0,6



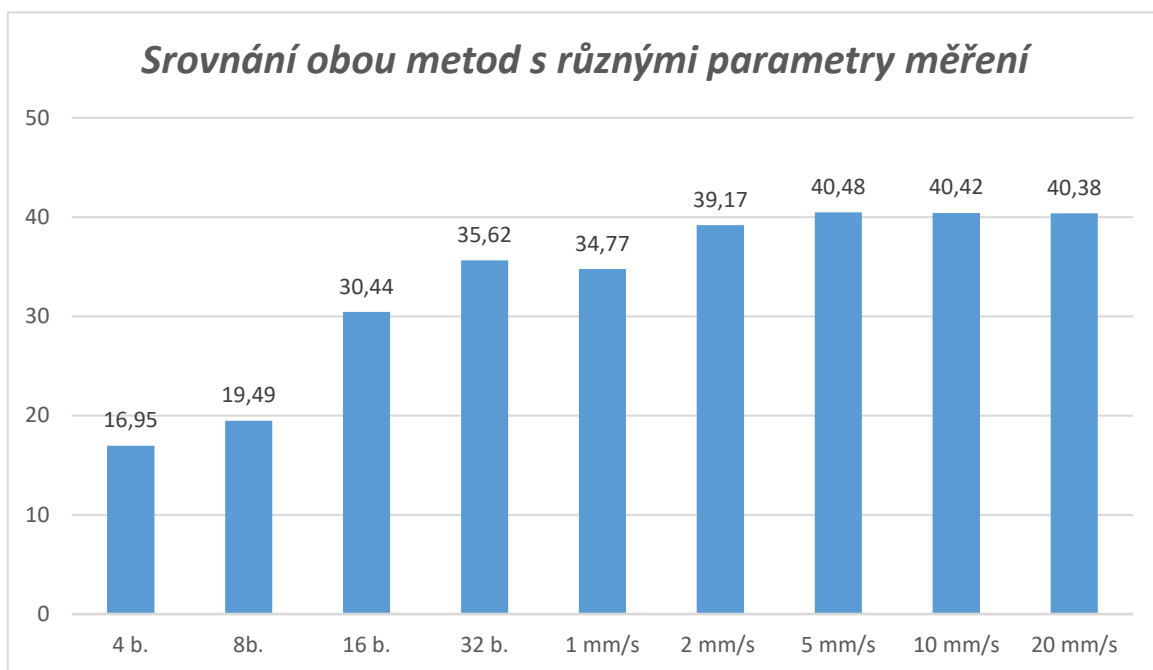
Graf 6.4 - Srovnání skenovací a bodové metody

Při pohledu na graf je zjevné, že kvůli zvětšující se drsnosti povrchu nabývají hodnoty odchyly viditelně větších hodnot než v předchozích grafech. U bodové metody je nejmenší naměřená hodnota odchyly 4 body a to $2 \mu\text{m}$. Nejvyšší vykazuje hodnotu $4,26 \mu\text{m}$ při měření 32 body. U skenovací metody je největší odchyly u rychlosti měření 20 mm/s která je $6,74 \mu\text{m}$ a nejmenší u rychlosti měření 1 mm/s a to je hodnota $5,13 \mu\text{m}$.

Tabulka 6.9 – Porovnání schémat skenovacích a bodových metod měření pro $R_a = 5,743 \mu\text{m}$ 

Tabulka 6.10 – Naměřené parametry odchyly kruhovitosti – $R_a = 5,743 \mu\text{m}$

Č. měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	\bar{x}	roz.
Bodová metoda												
4 b.	17,1	17,1	16,9	16,9	16,9	17,0	16,9	16,9	16,8	17,0	16,95	0,3
8 b.	18,8	19,3	19,4	19,4	19,8	19,4	19,6	19,9	19,6	19,7	19,49	1,1
16 b.	30,4	30,6	30,5	30,4	30,3	30,4	30,3	30,5	30,4	30,6	30,44	0,3
32 b.	35,4	35,7	35,7	35,5	35,7	35,6	35,7	35,7	35,7	35,5	35,62	0,3
Skenovací metoda												
1000 $\mu\text{m/s}$	34,8	34,3	35,1	34,6	34,6	34,5	34,9	35,0	35,0	34,9	34,77	0,8
2000 $\mu\text{m/s}$	39,8	38,6	38,9	38,8	39,2	39,3	39,3	39,5	39,0	39,3	39,17	1,2
5000 $\mu\text{m/s}$	40,7	40,4	41,1	39,9	41,1	40,4	40,8	39,8	40,6	40,0	40,48	1,3
10 000 $\mu\text{m/s}$	40,4	40,3	40,2	41,4	40,4	40,9	40,1	40,5	39,7	40,3	40,42	1,7
20 000 $\mu\text{m/s}$	40,1	40,8	40,7	40,7	40,2	40,0	40,6	40,0	40,4	40,3	40,38	0,8



Graf 6.5 - Srovnání skenovací a bodové metody

Poslední graf v pořadí nám vykazuje největší hodnoty odchyly kruhovitosti, jelikož měřený vzorek má i největší drsnost povrchu. U metody bodové máme opět největší hodnotu odchyly při měření 32 body která má hodnotu $35,62 \mu\text{m}$, naopak nejmenší hodnota u 4 bodového měření a ta je $16,95 \mu\text{m}$. U metody skenovací naměříme nejvyšší hodnotu v případě měření s rychlostí 5 mm/s která udává hodnotu odchyly $40,48 \mu\text{m}$ a nejmenší při rychlosti 1 mm/s a to $34,77 \mu\text{m}$.

6.2 Zhodnocení měření

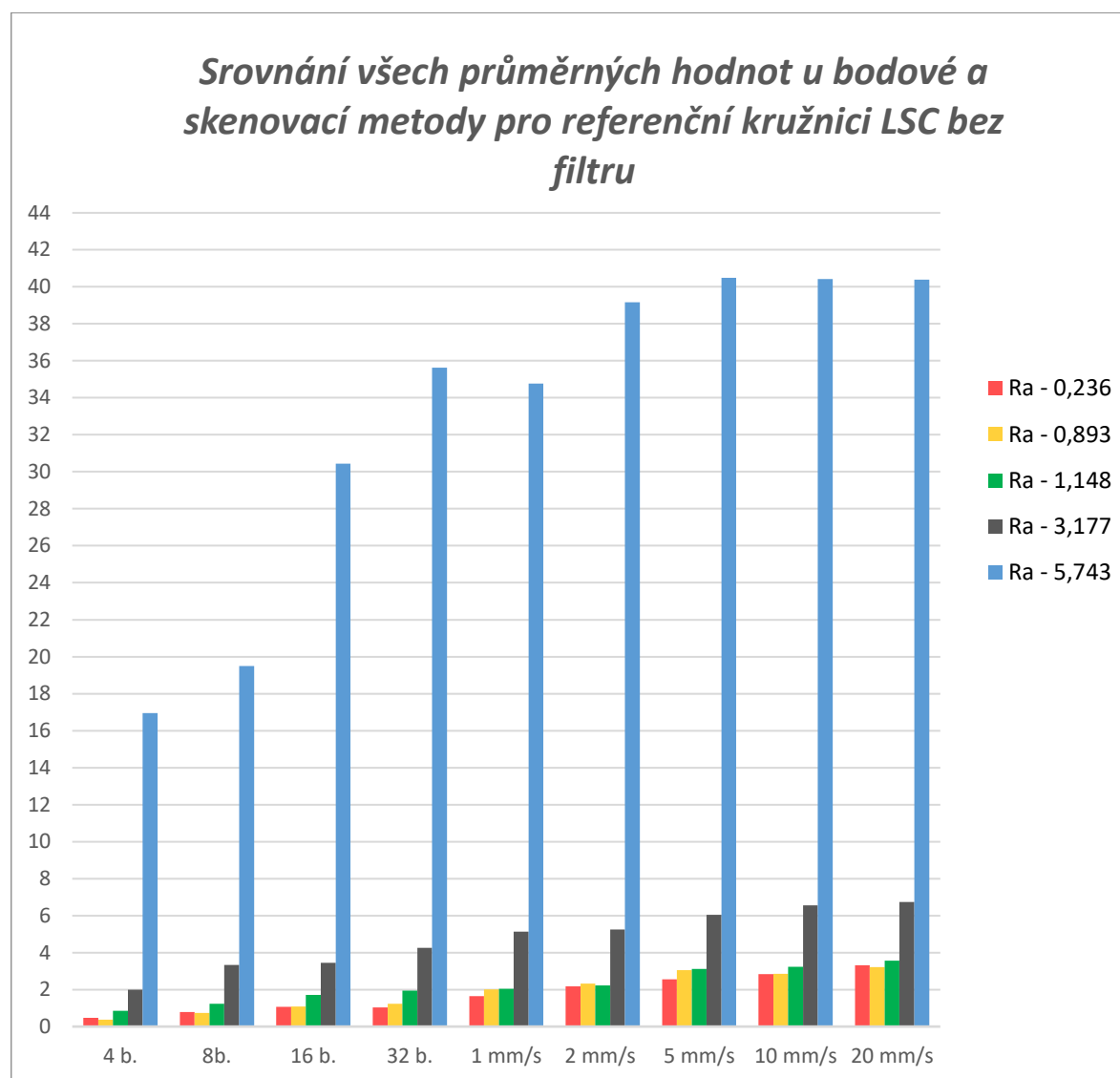
Z uvedeného grafu, který porovnává důležité parametry ovlivňující měření vyplívá, že stěžejních parametrů podepisujících se na odchylce kruhovitosti je hned několik. Je zjevné, že s počtem snímaných bodů odchylka kruhovitosti lineárně vzrůstá. Zprvu velmi záleží na drsnosti povrchu. Nejvyšší odchylku vykazují vzorky s velkou hodnotou drsnosti povrchu. Porovnáním vzorku Ra 0,236 μm se vzorkem Ra 5,743 μm můžeme zpozorovat rapidní nárůst odchylky vlivem právě uvedené nerovnosti povrchu.

Dalším důležitým aspektem je volba měřicí metody. Bodové měření vykazuje značné nepřesnosti oproti skenovací metodě. Vůbec největší nepřesnosti vykazuje bodové měření se čtyřmi dotyky po obvodu válce. S rostoucím počtem snímaných bodů roste i přesnost měření. U skenovací metody také záleží na zvoleném parametru. Měření 1 mm/s vykazuje přesnější výsledky než bodové měření, jelikož počet snímaných bodů je daleko větší. Největší přesnosti dosahuje měření 20 mm/s, kdy se jedná o nejvyšší počet snímaných bodů po obvodu v průběhu našeho experimentálního měření. Přibližné časy měření jsou uvedeny v tabulce 6.11.

U skenovací metody se jedná o přibližně stejné časy měření u všech pěti parametrů. U bodové metody se téměř úměrně zvyšuje čas s počtem snímaných bodů. Z uvedené tabulky tedy plyne, že skenovací metoda u měření odchylky kruhovitosti je časové úspornější a zároveň mnohem přesnější než metoda bodová.

Tabulka 6.11 – Přibližné časy zaznamenané u obou metod měření

Skenovací metoda		Bodová metoda	
<i>typ měření</i>	<i>doba trvání [s]</i>	<i>typ měření</i>	<i>doba trvání [s]</i>
1 mm/s	23	4 body	20,5
2 mm/s	23,4	8 bodů	39
5 mm/s	24,3	16 bodů	72,6
10 mm/s	24,9	32 bodů	142,8
20 mm/s	25,2		



Graf 6.1 – Srovnání metod měření

7 Závěr

Celá bakalářská práce byla zaměřena na problematiku odchylek kruhovitosti v závislosti na různých drsnostech povrchů pěti obrobků o stejných průměrech. Při závěrečném vyhodnocování kvality zhotovených součástí je odchylka kruhovitosti velice významným parametrem.

Díky výhodám třísouřadnicových měřících strojů můžeme na měření odchylky kruhovitosti použít dva způsoby, a to metodu skenovací (spojitou) nebo metodu bodovou (nespojitou), v tomto případě je pro nás na vyhodnocení kruhovitosti mnohem přesnější metoda skenovací na rozdíl od bodové, jelikož u metody skenovací je přístroj schopen naskenovat více bodů, tím dosáhneme přesnější hodnoty odchylky kruhovitosti. Použitá metoda není jediným faktorem, který má na měření vliv, záleží také na drsnosti povrchu dále i na metodě vyhodnocení, zda je provedena za použití filtru nebo bez. A právě na třísouřadnicovém stroji byl proveden rozbor této bakalářské práce.

V experimentální části bylo provedeno měření odchylky kruhovitosti na pěti vzorcích o průměru 60 mm s rozdílnou drsností povrchu. Měření bylo prováděno vždy na vnější straně každého vzorku. Odchylka se měřila v hloubce řezu $z = 6$ mm od roviny čela. K vyhodnocení byla použita metoda nejmenších čtverců LSC bez filtru.

Za pomoci dosažených výsledků lze vyhodnotit, že metodou skenovací (spojitou) dosahujeme značně přesnějších výsledků než u metody bodové (nespojitě). Z měření také plyne, že s rostoucí drsností roste odchylka kruhovitosti. Rozdíl mezi vzorky s nejmenší drsností a největší drsností je 37,06 μm při skenovací metodě s rychlostí měření 20 mm/s. U vzorků s větší drsností je vhodnější použití snímací kuličky o větším průměru.

Co se týče doby trvání v průběhu měření, lze konstatovat, že u skenovací metody je rozdíl naměřených časů zanedbatelný a nijak výrazně se od sebe neliší. U metody bodové čas trvání téměř lineární roste s počtem snímaných bodů.

Poděkování

V závěru bych ráda poděkovala vedoucí mé bakalářské práce Ing. Lence Čepové, Ph.D. za poskytnuté cenné rady a odborné vedení při zpracování práce.

Použitá literatura

- [1] DRBÚL, M., ŠAJGALÍK, M., ŠEMCER, J., CZÁNOVÁ, T., PETŘKOVSKÁ, L., ČEPOVÁ, L. *Strojárska metrologia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania*. Žilina: ŽU v Žilíně, strojnica fakulta, Katedra obrábania a výrobnjej techniky. 2014.
- [2] Předepisování přesnosti rozměrů, tvaru a polohy. [online]. [cit. 28.3.2018]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/?action=2&doc=10930>
- [3] DRASTÍK, F. *Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem. Tolerování rozměrů a geometrických vlastností*. Ostrava: Montanex 1996. ISBN 80-85780-18-6.
- [4] ČSN ISO 6318 (01 4410). Měření kruhovitosti: Termíny, definice a parametry kruhovitosti. 1994.
- [5] MIZERA, Ondřej. *Vliv velikosti snímacího dotyku na odchylku kruhovitosti* [online]. Ostrava 2015 [cit. 3.4.2018]. Bakalářská práce. VŠB-Technická universita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Lenka Čepová, Ph. D.
- [6] WOJTAS, J. *Hodnocení odchylky kruhovitosti na souřadnicovém měřicím stroji*. Ostrava 2009. Bakalářská práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie.
- [7] ADAMCZAK, S. *Možnosti vývoja relatívnych metód merania odchýlok kruhovitosti*. Žilina 1993. Doktorská dizertačná práca. ŽU v Žilíně, strojnica fakulta, katedra obrábania a výrobnjej techniky.
- [8] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [9] ČSN ISO 4292 (01 4412). *Metody hodnocení úchylek kruhovitosti - Měření dvoj a trojbodovou metodou*. 1995.
- [10] ČSN ISO 4291 (01 4411). *Metody hodnocení úchylek kruhovitosti – Měření změn poloměru*. 1994
- [11] ČSN P ISO/TS 12181-1 (01 4151). *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Kruhovitost – Část 1: Slovník a parametry kruhovitosti*. 2005
- [12] PETŘKOVSKÁ, L., ČEPOVÁ, L. *Metrologie a řízení kvality: učební text*. Ostrava: Vysoká

škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2771-1.

- [13] *CMM Metrology*. [online]. 2002 [cit. 4.4.2018]. Dostupný z WWW:<
www.cmmmetrology.co.uk
- [14] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*: studijní opora. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [15] NLX2500/700 - A Lathe by DMG MORI. DMG MORI Czech – CNC-controlled Lathes and Milling machines [online]. Copyright © 2018 DMG MORI All Rights Reserved [cit. 8.4.2018]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/products/lathes/universal-lathes/nlx/nlx2500-700>
- [16] PCLNR / PCLNL 95° CNMG EXTERNAL LEVER LOCK TURNING TOOL HOLDER. Home [online]. Copyright © Copyright 2014 Aydosa Tools and Carbide [cit. 15.4.2018]. Dostupné z: <http://www.aydosa-tools.com/index.php/aydosa-products/turning-tools-and-inserts/iso-turning-tools-external/19-external-iso-turning-tool-holders/46>
- [17] PH10 PLUS motoricky indexovatelné hlavice. Object moved [online]. Copyright © [cit. 21.4.2018]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/ph10-plus-motoricky-indexovatelné-hlavice--6684>
- [18] Norma ČSN ISO 6318 (01 4410). *Měření kruhovitosti: Termíny, definice a parametry kruhovitosti*. 1994
- [19] Kuličky. Chromová ocel 14 109 pro valivá ložiska. [online]. [cit. 29.4.2018] Dostupné z: http://kulicky.wbs.cz/14_109.pdf
- [20] HRBKOVÁ, Eliška. *Problematika měření obecných tvarových ploch s využitím CMM*. Praha 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [21] HOMMEL CS. Měření drsnosti a kontury. Hommel-etamic.cz [online]. ©2018. [cit. 6.5.2018]. Dostupné z: <https://www.hommel-etamic.cz/cz/produkty/mereni-drsnosti-kontury/>